Л. П. Крайзмер

Новые элементы электронных цифровых машин

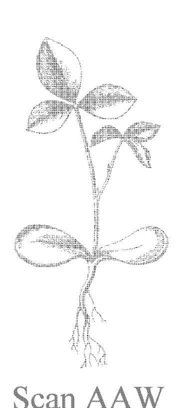


МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 426

Л. П. КРАИЗМЕР

НОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ЦИФРОВЫХ МАШИН





ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА 1961 ЛЕНИНГРАД

В книге дается краткий обзор современного состояния цифровой вычислительной техники и рассматриваются пути ее дальнейшего развития. В ней описываются простейшие конструкции новых элементов цифровых вычислительных машин, основанных на различных физических принципах. Основное внимание уделено описанию новых полупроводниковых, ферромагнитных и сверхпроводящих элементов, а также элементов, основанных на явлении параметрического возбуждения и работающих в сверхвысокочастотном диапазоне.

Книга рассчитана на подготовленных радиолюбителей и лиц, знакомых с основами радиотехники и электронной вычислительной техники.

6П2.15 *Крайзмер Леонид Павлович*

К88 **Новые элементы электронных цифровых машин.**

М. — Л., Госэнергоиздат, 1961.

96 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 426)

6П2.15

Редактор *В. Ф. Люстиберг* Техн. редактор *М. М. Широкова*

Сдано в набор 15/VI 1961 г. Подписано к печати 4/X 1961 г.

Формат бумаги $84 \times 108^1/_{32}$ 4,92 печ. л. Уч.-изд. л. 5,4

Т-11342 Тираж 40 000 экз. Цена 22 коп. Заказ 334

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Применение электронных вычислительных машин обеспечивает быстрый прогресс в науке и технике, организации и управлении производством, экономике и планировании, исследованиях космического пространства и т. п. В недалеком будущем вычислительные машины будут использоваться для целей диагностики, в биологических исследованиях, в области языковедения и ряде других гуманитарных наук, для организации автоматической справочно-информационной службы, автоматического перевода и решения многих других задач, требующих до настоящего времени работы человеческого мозга, но поддающихся математическому описанию.

Все это требует разработки и изготовления большого числа и разнообразного ассортимента универсальных и специализированных вычислительных машин различных типов, обеспечивающих целесообразность их применения в каждом конкретном случае.

Современная вычислительная машина представляет собой агрегат, содержащий десятки и сотни тысяч, а иногда и миллионы отдельных элементов, от размеров, экономичности и быстродействия которых зависят основные параметры машины.

В данной книге приводится краткое описание разработанных за последние годы элементов вычислительных машин, а также рассматриваются простейшие принципиальные схемы, поясняющие методы применения отдельных элементов, являющихся специфическими для вычислительной техники. К таковым относятся в первую очередь раз-

личные элементы, характеризующиеся двумя устойчивыми состояниями, так называемые двухпозиционные элементы, являющиеся основными «кирпичиками», из которых строятся арифметические и запоминающие устройства и различные логические схемы. В виде исключения описано несколько типов новых полупроводниковых приборов, перспективных с точки зрения применения их в вычислительных машинах.

Автор полагает, что брошюра может оказаться полезной для всех читателей, интересующихся вычислительной техникой.

Л. КРАЙЗМЕР

СОДЕРЖАНИЕ

Глава первая

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

1. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Всего лишь около 15 лет прошло с момента создания первой электронной цифровой вычислительной машины ЭНИАК, построенной в Технической школе в Филадельфии (США). За этот короткий период в развитии цифровой вычислительной техники произошел огромный количественный и качественный скачок — от громоздких, ограниченных по своим возможностям и относительно медленно действующих до малогабаритных сверхбыстродействующих универсальных машин.

Машина ЭНИАК размещалась в комнате длиной более 30 *м*, содержала 18 000 электронных ламп, потребляла 100 *квт* электроэнергии и затрачивала на одно сложение или вычитание около 200 *мксек*, а на умножение 2 300 *мксек*. Современная машина типа С-2000 (США), построенная почти полностью на транзисторах, при значительно меньших размерах и в несколько раз меньшем потреблении энергии обеспечивает выполнение сложения или вычитания за время 16 *мксек* и умножения примерно за 40 *мксек*.

Созданы образцы машин, в которых операция сложения требует затраты времени всего 1—2 и даже менее 1 *мксек*. Имеются также машины, которые хотя и характеризуются скоростью работы примерно такого же порядка, как ЭНИАК, но несравненно меньше ее по размерам. Так, например, портативная вычислительная машина Рекомп-11

(США), построенная на транзисторах, имеет размеры всего лишь 581×533×419 *мм*, весит 90 *кг* и потребляет около 40 *вт* электроэнергии.

Такое стремительное совершенствование цифровой вычислительной техники, обусловленное постоянно возрастающими требованиями потребителей, в свою очередь стимулировало быстрое расширение областей применения цифровых вычислительных машин в науке и технике для механизации самых разнообразных видов умственного труда человека.

Основными областями применения цифровых вычислительных машин в настоящее время и в ближайшем будущем являются следующие:

1. Решение разнообразных математических задач, требующих большого объема вычислений, составление всевозможных таблиц, осуществление технических расчетов сооружений, вычисление траекторий полета летательных аппаратов, астрономические вычисления и т. п. Для этих целей обычно применяются универсальные цифровые вычислительные машины, которые группируются, как правило, в вычислительных центрах, располагающих кадрами квалифицированных программистов и обслуживающих в большинстве случаев несколько научно-исследовательских или проектных организаций.

2. Управление различными производственными процессами и движением транспортных объектов. Для этой цели чаще всего применяются специализированные машины с жестким программным управлением, обеспечивающим реализацию одного или нескольких определенных алгоритмов решения задач, связанных с управлением конкретным процессом.

Особенно важное значение имеет применение вычислительных машин для управления беспилотными летательными аппаратами, такими как баллистические ракеты, искусственные спутники, космические исследовательские ракеты и т. п. Здесь машины полностью выполняют функции пилота, штурмана, радиста и других членов экипажа.

3. Быстрая и точная обработка разнообразной информации или, как часто говорят, обработка данных. К этой области относится решение задач, связанных с учетом и планированием в производстве, сельском хозяйстве, товарообороте, обработка всевозможных статистических све-

дений, результатов переписей, исследование производственных операций, решение задач линейного программирования, обеспечивающих оптимальное планирование производства и транспорта и т. п.

4. Выполнение научно-информационной и библиографической работы, которая может осуществляться машинами с долговременными запоминающими устройствами большой емкости. Эти машины предназначены для переработки, группирования и систематизации огромных все возрастающих потоков информации в различных отраслях знания и выдачи их в обработанном виде по запросу.

5. Машинный перевод текстов с одного языка на другой. Для практического решения этой задачи требуются быстродействующие машины с весьма большим объемом оперативных запоминающих устройств. Эти устройства должны хранить и быстро выдавать в другие блоки машины словарные материалы, инструкции по машинному грамматическому анализу текста на языке-оригинале и синтезу текста на языке, на который производится перевод.

6. Машины для автоматического анализа и обработки его результатов при химических, физических, медико-биологических и других исследованиях. К такому типу машин относятся, например, диагностические машины, машины для автоматического анализа крови и т. п.

Здесь перечислены некоторые наиболее исследованные области применения современных цифровых вычислительных машин. Следует указать, что в различных странах машины получили более или менее широкое применение лишь для решения задач, отнесенных к первым трем областям. В остальных областях применение машин пока что еще не вышло из стадии теоретических исследований и первых экспериментальных разработок, хотя нет сомнения, что в недалеком будущем следует ожидать существенного прогресса в практическом использовании вычислительных машин для справочно-информационных и других целей, автоматизации эксперимента и обработки его результатов. Несомненно и то, что диапазон применения машин для автоматизации процессов умственного труда будет в дальнейшем быстро расширяться. Уже сейчас имеются работы, посвященные исследованию возможностей использования машин в области гуманитарных наук, для оркестровки музыкальных произведений, для доказательства математических теорем и т. п.

Естественно, что расширение диапазона применения машин требует и расширения их номенклатуры и непрерывного совершенствования технических характеристик, в значительной мере определяемых характеристиками элементов, из которых строится машина.

2. ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ ЦИФРОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Первой советской электронной цифровой машиной была сконструированная в начале 50-х годов малая электронная счетная машина (МЭСМ). Основными элементами арифметических и запоминающих устройств в этой машине были ламповые триггеры, что, естественно, требовало наличия в ней весьма большого числа электронных ламп и значительного расхода энергии на их питание. Машина МЭСМ, представляющая в наше время лишь чисто исторический интерес, была относительно медленнодействующей, на ней можно было выполнять около 50 элементарных арифметических операций в секунду.

Следующим важным этапом явилось создание в 1953 г. двух больших быстродействующих электронных машин: БЭСМ (быстродействующая электронная счетная машина) и «Стрела».

Машина БЭСМ неоднократно модернизировалась. В первом варианте она имела оперативное запоминающее устройство на ртутных линиях задержки, которое позднее было заменено устройством на электронно-лучевых трубках, а с 1956 г. в машине работает магнитное оперативное запоминающее устройство (МОЗУ) на ферритовых сердечниках. В новом варианте вычислительной машины БЭСМ-2 все вакуумные диоды заменены германиевыми, что уменьшило ее размеры и позволило резко снизить расход энергии на питание.

Ввод данных в машину осуществляется с перфорированной ленты. Результаты вычислений считываются при помощи электромеханического печатающего устройства или более быстродействующего фотопечатающего устройства. Машина БЭСМ выполняет около 10 000 арифметических операций в секунду, имеет широкие математические возможности, надежна и устойчива в работе. Модернизированный вариант машины (БЭСМ-2) в настоящее время находится в серийном производстве.

Машина «Стрела» работает со скоростью 2 000—3 000 операций в секунду. Ввод данных в нее осущест-

вляется с перфокарт, а считывание производится при помощи печатающего устройства, которое работает также от перфокарт, выполняющих при выдаче результатов роль промежуточного звена. Ряд машин этого типа успешно эксплуатируется в вычислительных центрах нашей страны.

В 1952 г. была создана, а в 1954—1955 гг. модернизирована малогабаритная машина М-2. По сравнению с машинами БЭСМ и «Стрела» машина М-2 имеет значительно меньшие размеры и более экономична, однако математические возможности и скорость ее работы относительно невысоки.

Все перечисленные машины работают по трехадресной системе программ.

В 1955 г. была создана одноадресная машина «Урал», которая относится к классу малых универсальных машин и предназначена для механизации расчетно-вычислительных работ в научно-исследовательских институтах, конструкторских бюро, высших учебных заведениях и т. п. Машина «Урал» уже несколько лет находится в серийном производстве и является самой распространенной из советских вычислительных машин.

В 1958—1959 гг. создан модернизированный вариант машины «Урал-2», в котором оперативное запоминающее устройство собрано на ферритовых сердечниках, что позволило повысить быстродействие со 100 до 5 000 операций в секунду.

В 1955—1957 гг. была создана простая и относительно дешевая малогабаритная машина М-3, скорость работы которой составляет около 30 операций в секунду, предназначенная для выполнения широкого круга математических вычислений сравнительно небольшого объема. Разработан также вариант машины М-3 с оперативным запоминающим устройством на магнитных сердечниках, обладающий значительно бóльшим быстродействием.

Дальнейшей разработкой является машина «Киев», обеспечивающая выполнение около 10 000 — 13 000 операций в секунду.

Большой интерес представляют две оригинальные универсальные машины, собранные целиком на магнитных элементах и содержащие электронные лампы лишь в источниках питания. Одна из них, ЛЭМ-1, разработана в 1956—1958 гг.

Интересной особенностью машины «Сетунь» является то, что это первая машина, работающая в троичной систе-

ме счисления, обладающей, по мнению авторов разработки, рядом преимуществ с точки зрения экономичности конструкции устройств машины и простоты выполнения арифметических операций.

Кроме перечисленных достаточно широко известных быстродействующих цифровых вычислительных машин, в ряде научно-исследовательских учреждений и конструкторских бюро нашей страны ведется интенсивная работа по созданию новых типов универсальных и специализированных машин, обладающих значительно большей скоростью, более экономичных и имеющих небольшие размеры.

Основными резервами, которые позволят осуществить такое улучшение показателей машин, являются широкая замена электронных ламп полупроводниковыми, магнитными и другими более совершенными и экономичными приборами, разработка новых принципов работы и схемных решений основных устройств, совершенствование технологии изготовления отдельных элементов и типовых блоков.

3. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ЗАРУБЕЖНЫХ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Как уже упоминалось, первая электронная цифровая вычислительная машина ЭНИАК была создана в США. Эта машина разрабатывалась в последние годы Второй мировой войны, и первая публичная демонстрация ее работы после рассекречивания состоялась в 1946 г. В дальнейшем в США продолжались интенсивные работы в области цифровой вычислительной техники, и в настоящее время там находится в эксплуатации несколько тысяч машин более чем 100 различных типов, в том числе уникальные машины со скоростью работы, измеряемой сотнями тысяч операций в секунду.

Поэтому, говоря о состоянии вычислительной техники в капиталистических странах, следует проанализировать технические достижения и перспективы дальнейшего развития этой отрасли техники в наиболее развитой из капиталистических стран — США.

Наряду с использованием вычислительных машин в различных научно-исследовательских учреждениях и лабораториях в США заметно проявляется заинтересованность крупных капиталистических фирм и монополий в широком внедрении вычислительной техники для автоматизации некоторых производственных процессов, для экономических

расчетов, планирования производственного процесса, обработки данных в сфере промышленности, товарооборота и транспорта.

Ведущую роль в американском производстве радиоэлектронного оборудования играет фирма «Интернейшнл бизнес мэшинз корпорейшн» (ИБМ). Уже к началу 1958 г. эта фирма выпустила около 700 машин только типа ИБМ-650, являющихся наиболее распространенным типом машин в США и в странах Западной Европы.

ИБМ-650 является машиной среднего класса. Числа в ней представлены в двоично-десятичной системе. Оперативное запоминающее устройство состоит из магнитного барабана емкостью 2 000 чисел и схемы на магнитных сердечниках емкостью 60 чисел. Кроме того, в машине имеется запоминающее устройство на магнитных дисках емкостью до 6 млн. десятичных цифр, представленных двоичным кодом. В комплект машины входят также шесть запоминающих устройств на магнитных лентах. Для ввода и вывода данных применены устройства на перфокартах; кроме того, для вывода имеется построчное печатающее устройство. Время сложения двух чисел равно 0,77 *мсек*, умножения 12 *мсек,* деления 16 *мсек*. Мощность питания достигает 70 *ква*.

Широкое распространение получили также и другие модели машин фирмы ИБМ, а именно: 604, 626, 704. В эксплуатации находится несколько сотен машин, выпущенных и другими фирмами США.

Одной из наиболее быстродействующих машин в мире в течение ряда лет являлась машина НОРК, построенная фирмой ИБМ в 1955 г. Эта машина, предназначенная для исследований в области артиллерийского вооружения военно-морского флота, работает со скоростью 60 000 сложений или 30 000 умножений в секунду. Она содержит 8 000 электронных ламп и 25 000 полупроводниковых диодов. Ее оперативное запоминающее устройство на электронно-лучевых трубках имеет емкость 3 600 чисел по 13 десятичных разрядов каждое. Внешние запоминающие устройства машины, используемые для ввода информации, временного хранения промежуточных результатов и записи конечных результатов, состоят из восьми сверхскоростных блоков на магнитных лентах со скоростью чтения или записи до 70 000 знаков.

В 1959 г. с целью модернизации машины начаты работы по замене электронно-лучевых трубок запоминающим

устройством на магнитных сердечниках с транзисторным управлением. Емкость этого оперативного запоминающего устройства составит 20 000 шестнадцатиразрядных десятичных чисел. Печатающее устройство, применяемое для вывода данных из машины, работает со скоростью 300 знаков в секунду. Кроме того, вновь разработано скоростное печатающее устройство на электронно-лучевых трубках типа «характрон».

В 1957 г. фирмой Филко корпорейшн была разработана одна из первых больших машин на полупроводниковых приборах, получившая наименование С-2000. Эта машина выполняет 60 000 сложений или вычитаний, 26 000 умножений и 17 000 делений в секунду. Емкость ее оперативного запоминающего устройства на магнитных сердечниках составляет 4 096 чисел. Внешними запоминающими устройствами в машине служат магнитные ленты со скоростью записи и чтения 90 000 знаков в секунду. Для ввода и вывода применяются перфокарты и перфоленты со скоростью чтения до 1 000 цифр в секунду. Имеется промежуточная память на магнитном барабане емкостью 32 768 чисел. В качестве основных электронных элементов в машине применены поверхностно-барьерные транзисторы. Общее число транзисторов достигает 43 000.

В том же 1957 г. в Линкольновской лаборатории Массачузетского технологического института была построена машина ТХ-2, которая может выполнять до 130 000 сложений и до 60 000 умножений в секунду. Емкость оперативного запоминающего устройства этой машины, построенного на магнитных сердечниках, достигает 262 144 чисел. В машине имеется также первое в мире действующее запоминающее устройство на тонких ферромагнитных пленках емкостью 32 числа со временем полного цикла 0,8 *мксек*. Всего в машине используется 22 000 транзисторов и 625 электронных ламп.

В заключение этого очень неполного перечня американских вычислительных машин приведем некоторые сведения о сверхбыстродействующей машине СТРЕТЧ, представляющей наибольший интерес с точки зрения перспектив развития вычислительной техники. Первый экземпляр этой машины был построен фирмой ИБМ в 1960 г. для Комиссии по атомной энергии США. Машина СТРЕТЧ может работать со скоростью 2 000 000 сложений или 500 000 умножений в секунду. Она оперирует с числами, соответствующими 12—15 десятичным разрядам, представленным

как с фиксированной, так и с плавающей запятой. В машине имеются два оперативных запоминающих устройства на магнитных сердечниках: основное емкостью 8 192 числа с временем выработки 2 *мксек* и сверхоперативное емкостью 512 чисел с временем выборки 0,5 *мксек*. В качестве промежуточного запоминающего устройства применены магнитные диски с общей емкостью до 1 000 000 чисел и временем обращения в 4 *мсек*. Машина построена на специальных высокочастотных полупроводниковых диодах и транзисторах, работающих на основной частоте 10 *Мгц*.

В Англии, занимающей второе место среди капиталистических стран по применению электронной вычислительной техники, широко распространены машины американского образца, прежде всего различные типы машин фирмы ИБМ, имеющей в этой стране свои дочерние предприятия.

Среди крупнейших английских фирм, выпускающих электронные машины, можно упомянуть фирмы Эллиот, Ферранти, Бритиш табулейтинг мэшин.

В выпускавшихся до последнего времени английских машинах в качестве оперативных запоминающих устройств применялись магнитные барабаны, которые обходятся, по утверждению англичан, в несколько десятков раз дешевле, чем устройства на ферритовых сердечниках. Это, однако, существенно ограничивает скорость работы машин, поэтому англичане стремятся сконструировать более быстродействующие и в то же время недорогие оперативные запоминающие устройства, в частности, в некоторых типах машин применяются устройства на магнитострикционных линиях задержки из никелевой проволоки.

Среди других капиталистических стран следует выделить Японию, где предложен ряд новых и интересных принципов, положенных в основу создания вычислительных машин. Около половины всех эксплуатируемых в Японии машин (а общее число работающих там машин составляет несколько десятков) представляют собой машины, построенные на так называемых параметронах — элементах с параметрическим возбуждением. Эти машины, хотя и работают с меньшей скоростью, но зато по сравнению с ламповыми или транзисторными обходятся в несколько раз дешевле и, кроме того, они значительно надежнее, так как основные узлы их логических и запо-

минающих устройств не содержат в себе активных элементов, имеющих ограниченный срок службы. В машинах, построенных на параметронах, электронные лампы применяются только в источниках питания.

Имеются сообщения, что в настоящее время в Японии ведется работа над созданием машины, в качестве основных элементов которой будут применены изобретенные Есака в 1958 г. туннельные диоды — плоскостные диоды с так называемым квантово-механическим туннельным эффектом носителей. Предполагается, что машины на туннельных диодах смогут работать с частотой следования тактовых импульсов до 30—100 *Мгц*, а время переключения диода может быть доведено до 1 *нсек* и менее.

4. ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗВИТИЯ ЦИФРОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИН

Несмотря на быстрый рост числа находящихся в эксплуатации вычислительных машин, потребность в них удовлетворяется в самой минимальной степени, причем по мере дальнейшего освоения методов машинного счета и автоматического управления производственными процессами эта потребность будет возрастать.

Таким образом, одной из важнейших задач радиоэлектронной промышленности является всемерное расширение производства уже освоенных типов электронных машин при одновременном улучшении их производительности, надежности, экономичности и других тактико-технических показателей.

В ближайшие годы следует ожидать стремительного роста выпуска недорогих и экономичных машин со скоростью работы порядка нескольких тысяч, а в дальнейшем и нескольких десятков тысяч арифметических операций в секунду. Такие машины должны стать доступными научным учреждениям, конструкторским бюро, заводам, планирующим организациям, высшим учебным заведениям и органам управления.

Не следует забывать, что, несмотря на большие успехи, достигнутые в области повышения скорости работы цифровых вычислительных машин, их быстродействие зачастую совершенно недостаточно для решения важных научно-технических задач. К таким задачам относится, в частности, автоматическое управление различными быстропротекающими производственными процессами и процессами управ-

ления сверхскоростным транспортом, требующие расчета в минимальные промежутки времени ряда вариантов управляющих воздействий с учетом сложной внешней обстановки и выбора оптимального варианта.

Если проследить пути развития электронной вычислительной техники за истекшие 15 лет, то можно наглядно убедиться в неизменной тенденции к всемерному наращиванию скорости работы машин.

Так, если скорость работы первых машин, появившихся в середине 40-х годов, составляла сотни и тысячи арифметических операций в секунду, то уже в середине 50-х годов была достигнута скорость порядка нескольких десятков тысяч операций (НОРК, ЛАРК, С-2000 и др.), а в 1957 г. была создана машина ТХ-2, выполняющая до 130 000 операций в секунду. Наконец, начало 60-х годов знаменуется вводом в эксплуатацию машин, скорость работы которых будет измеряться уже миллионами операций в секунду (СТРЕТЧ и др.).

Таким образом, за 15 лет быстродействие машин возросло примерно на четыре порядка, с 10^2 до 10^6 операций в секунду. Вычислительная техника уже близка к достижению максимально осуществимой скорости выполнения операций, ограниченной скоростью распространения импульсов, равной скорости света.

В самом деле, выполнение различных арифметических операций на вычислительных машинах сопровождается изменением состояния их элементов и обменом информацией между этими элементами, который практически осуществляется в виде передачи электрических импульсов от одного элемента или от одного блока машины к другому. Так как во всякой реальной машине ее блоки или элементы находятся на некотором расстоянии один от другого, то передача импульсов совершается в некоторый конечный промежуток времени, равный частному от деления расстояния между элементами на скорость распространения импульсов, т. е. на скорость света (фактически электрические импульсы распространяются по проводам со скоростью, меньшей скорости света, но этой разницей можно пренебречь).

Если предположить, что в результате разработки малогабаритных элементов и рациональной компоновки удастся построить машины с такими размерами, что расстояние между их элементами не будет превышать десятков сантиметров, то можно подсчитать время, требующееся для пе-

ремещения информации от элемента к элементу. Если, например, допустить расстояние между элементами 30 *см*, то время распространения импульса между элементами составит:

$$\tau = \frac{30}{3 \cdot 10^{10}} = 10^{-9}\ \textit{сек} = 1\ \textit{нсек}.$$

Таким образом, если даже предположить, что время срабатывания элементов машины приближается к нулю, и считать, что при выполнении арифметической операции требуется перемещение лишь одного импульса от элемента к элементу, то оказывается, что максимальная скорость работы машины может составить лишь около 10^9 операций в секунду. Так как время срабатывания элементов не может быть снижено до нуля, а время выполнения операции практически не ограничивается передачей одного импульса, то фактическая скорость машины, которая может быть достигнута при заданных размерах, составит около 10^8 операций в секунду.

Правда, повышение быстродействия с 10^6 до 10^8 операций в секунду является делом весьма сложным, так как для этого требуются разработка и промышленное освоение элементов, необходимых для создания малогабаритных машин с достаточно широкими математическими возможностями.

Как уже говорилось, расширение диапазона решаемых на машине задач требует увеличения количества элементов в машине, особенно за счет значительного повышения объема запоминающих устройств. Например, объем оперативной памяти машин увеличился с нескольких десятков чисел у первых машин до тысяч и десятков тысяч чисел у современных машин. Объем запоминающих устройств у будущих справочно-информационных и переводческих машин должен будет измеряться миллионами, а в дальнейшем и миллиардами чисел.

Естественно, что создание машин с таким огромным числом элементов при одновременном уменьшении размеров станет возможным лишь в результате дальнейшей миниатюризации и микроминиатюризации этих элементов. Наконец, весьма важным фактором становится снижение расхода необходимой для питания энергии, что требует создания экономичных элементов.

Таким образом, основным направлением технического прогресса электронной вычислительной техники является

создание микроминиатюрных элементов. Микроминиатюризация позволяет комплексно решать задачу создания машин, отличающихся высоким быстродействием, малыми размерами, экономичных в эксплуатации и технологичных при изготовлении.

Рассмотренный путь повышения скорости работы машин за счет применения более быстродействующих элементов и уменьшения их размеров может быть назван техническим путем. Однако им не исчерпываются возможности дальнейшего повышения скорости решения математических задач на машинах. Даже тогда, когда удастся достигнуть максимальной, соответствующей данному уровню развития техники, скорости выполнения машиной арифметических операций, остаются еще значительные резервы ускорения решения задач за счет разработки новых принципов организации работы машины, построения ее структуры, выбора рационального алгоритма решения задачи, улучшения системы программирования и др. Этот так называемый структурный путь повышения быстродействия цифровых машин может включать в себя такие способы, как совмещение отдельных операций, использование запоминающих устройств с независимыми и одновременными системами обращения по нескольким адресам, применение ступенчатой и параллельной организации вычислительного процесса и т. п.

Большое значение имеет также повышение надежности машин, которое при решении задач вычислительного характера в конечном счете ускоряет получение результата за счет снижения непроизводительных простоев оборудования, а для управляющих машин имеет первостепенную важность, гарантируя безаварийное протекание управляемых процессов.

Одной из важнейших задач при разработке новых машин является совершенствование устройств ввода и вывода информации. Применяемые в настоящее время устройства плохо согласованы по скорости с другими блоками машин. Основным методом ввода до сих пор является ввод с перфоносителей, которые заготавливаются операторами заранее вручную.

Важной задачей является разработка вводных устройств, которые позволяли бы машине «читать» информацию непосредственно с печатного текста. Принципиально такие устройства уже разработаны, однако они пока очень сложны, дороги и недостаточно надежны.

В будущем предстоит решить задачу ввода в машину информации непосредственно с голоса, что особенно важно для автоматического перевода речей на другие языки сразу вслед за ораторами. При выводе информации из машин предстоит создать устройства, обеспечивающие непосредственный вывод со значительно большей скоростью, чем на современных буквопечатающих механизмах. Для этой цели уже сейчас применяют фотопечатающие устройства, трубки типа «характрон» для визуальной выдачи результатов и другие системы.

На очереди разработка систем, которые обеспечивали бы выдачу информации в виде устной речи, что также особенно существенно в машинах для автоматического устного перевода.

Глава вторая

НОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

5. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Одним из основных путей, обеспечивающих улучшение технических показателей машин, повышающих их эксплуатационную надежность и снижающих стоимость, является широкое использование полупроводниковых приборов в схемах арифметических, запоминающих и управляющих устройств цифровых вычислительных машин. Срок службы полупроводниковых приборов в ряде случаев превышает срок службы пассивных радиодеталей. Это позволяет рассчитывать вычислительные устройства на длительную работу без замены элементов и допускает замену пайкой большого числа контактных соединений, что в свою очередь значительно повышает надежность действия машин.

Применение полупроводниковых приборов обеспечивает существенное повышение экономичности машин как за счет непосредственной экономии на питании, так и благодаря тому, что в машинах на полупроводниках выделяются малые тепловые мощности и это позволяет обходиться без специальных устройств охлаждения и вентиляции. Кроме того, машины на полупроводниках значительно компактнее, что при эксплуатации снижает расходы на содержание помещений, а в условиях применения их для управления

такими объектами, как летательные аппараты, представляет собой решающее преимущество.

Напряжение питания схем на полупроводниковых приборах обычно не превышает 10—20 *в*, а в некоторых случаях может быть снижено и до единиц вольт. Это значительно упрощает и удешевляет источники питания

Все сказанное позволяет утверждать, что широкое внедрение полупроводниковых приборов в вычислительную технику является одним из наиболее радикальных способов существенного улучшения различных параметров электронных вычислительных машин.

На полупроводниковых диодах и транзисторах разработаны и применяются в действующих установках разнообразные схемы переключателей, триггеров, мультивибраторов, инверторов, сумматоров, логические схемы, схемы управления запоминающими устройствами и т. п. В этих схемах на первых этапах внедрения полупроводников в электронные машины применялись как точечно-контактные, так и плоскостные транзисторы обычных типов. В настоящее время в связи с разработкой плоскостных приборов с хорошими частотными характеристиками точечные приборы в новых разработках почти не применяются. Однако получившие широкое распространение в различных радиотехнических схемах серийные плоскостные триоды — транзисторы, предельная рабочая частота которых не превышает 0,5—1,5 *Мгц*, зачастую не удовлетворяют требованиям, предъявляемым к приборам, работающим в схемах машин с высокой тактовой частотой. Поэтому в современных разработках электронных цифровых машин все чаще применяются специальные высокочастотные транзисторы с предельной частотой порядка десятков и сотен мегагерц и туннельные диоды, имеющие широкие перспективы применения в сверхбыстродействующих машинах.

6. ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Поверхностно-барьерные транзисторы. Повышение граничной частоты в поверхностно-барьерных транзисторах достигается снижением толщины базы до нескольких микрон путем применения специальной технологии их производства. Пластинка германия с проводимостью типа *n* стравливается химическим способом до толщины в несколько десятков микрон. Травление далее продолжается так называемым электрохимическим путем, которое заключается в том, что на пластинку с противоположных сторон

направляются тонкие струи электролита. Таким образом, толщина пластинки доводится до нескольких микрон, а на обеих сторонах базы образуются слои, почти лишенные примесных атомов (с собственной проводимостью типа *i*), толщиной порядка 1—2 *мк.*

После этого также электрохимическим методом на обе стороны утоньшенной части базы наносят слои индия, образующие эмиттер и коллектор. После очистки поверхности транзистора путем химического травления ее покрывают защитным слоем и весь прибор помещают в герметизированный корпус.

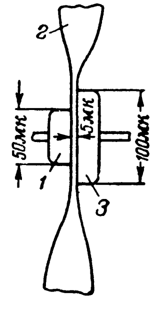


Рис 1. Поверхностно-барьерный транзистор.
1 — эмиттер; *2* — база; *3* — коллектор.

Схематическая конструкция и примерные размеры поверхностно-барьерного транзистора показаны на рис. 1. Благодаря небольшим размерам рабочей поверхности внутренние ёмкости триода весьма невелики. Граничная частота прибора при толщине базы 5 *мк* составляет около 56 *Мгц*. Созданы поверхностно-барьерные транзисторы с граничной частотой до 100 *Мгц*. Их допустимая мощность рассеивания вследствие малых размеров рабочей поверхности мала и составляет несколько милливатт. В нашей стране разработаны и изготовляются поверхностно-барьерные транзисторы типов П404 и П405.

На поверхностно-барьерных транзисторах успешно строятся так называемые схемы с непосредственными связями. Принцип построения этих схем заключается в следующем.

Как известно, сопротивление коллекторного перехода транзисторов при переключении их из режима насыщения в режим отсечки резко меняется. Открытый транзистор, работающий в режиме насыщения, имеет небольшое сопротивление коллекторного перехода, и поэтому напряжение на его коллекторе (в схеме с общим эмиттером) при достаточно большом сопротивлении нагрузки в цепи коллектора оказывается весьма малым (порядка долей вольта). Поэтому, если коллектор такого транзистора соединить непосредственно с базой другого транзистора, включенного таким же образом, то этот последний окажется в закрытом состоянии, т. е. в режиме отсечки.

Напряжение на коллекторе закрытого транзистора с общим эмиттером вследствие большого сопротивления его коллекторного перехода оказывается практически равным

напряжению источника питания коллектора, и если коллектор этого транзистора соединить с базой другого транзистора, также включенного по схеме с общим эмиттером, то второй транзистор будет находиться в режиме насыщения.

На рис. 2 приведена в качестве примера схема триггера с непосредственными связями, построенная на поверхностно-барьерных транзисторах. Схема всегда находится в одном из двух возможных устойчивых состояний, характеризующихся тем, что один из транзисторов открыт (режим насыщения), а другой закрыт (режим отсечки).

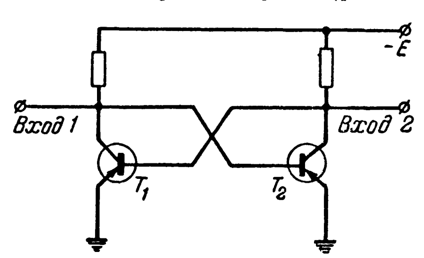


Рис. 2. Схема триггера с непосредственными связями.

Устойчивое состояние схемы триггера сохраняется до тех пор, пока под влиянием внешнего сигнала он не будет переброшен в другое устойчивое состояние. В самом деле, если на вход триггера T_1 подать положительный импульс, то он попадет на базу транзистора T_2 и закроет его. При этом коллекторный ток транзистора T_2 резко снизится, напряжение на его коллекторе станет равным напряжению источника питания, и это напряжение, поступая на базу транзистора T_1 откроет его. Это в в свою очередь вызовет увеличение коллекторного тока транзистора T_1, повышение (практически до нуля) напряжения на его коллекторе, а значит, и на базе транзистора T_2, и закрытие последнего.

Аналогично подачей положительного импульса на вход *2* триггера последний переводится в такое устойчивое состояние, при котором транзистор T_1 закрывается, а транзистор T_2 открывается.

На рис. 3 приведена схема триггера с непосредственными связями с общим (счетным) входом. В этой схеме отрицательный импульс, поступающий на общий вход, усиливается тем запускающим транзистором (T_3 или T_4), коллектор которого находится в момент поступления импульса под более высоким отрицательным потенциалом. Таким образом, этот импульс будет проходить на базу открытого транзистора триггера (T_1 или T_2), что приведет к переброске триггера в противоположное состояние.

Важными преимуществами схем с непосредственной связью являются крайняя простота, дешевизна, малое потребление энергии, хорошие частотные характеристики и возможность питания от низковольтных (порядка 1,5 *в*) источников.

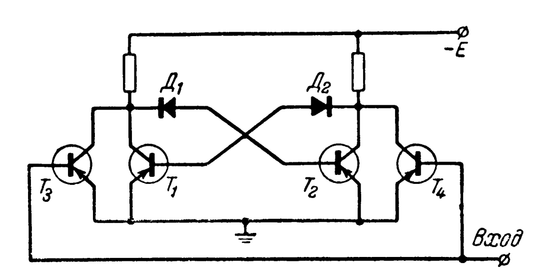


Рис. 3. Схема триггера с непосредственными связями с общим входом.

На поверхностно-барьерных транзисторах строятся также собирательные схемы, схемы совпадения и другие логические схемы, сумматоры, сдвигающие регистры и т. п. Имеются сообщения о постройке на элементах с непосредственными связями с поверхностно-барьерными триодами таких машин, как «Транзак» и «Лепречаун» (США).

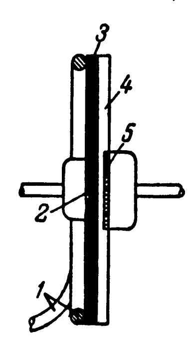


Рис. 4. Дрейфовый транзистор типа *p-n-i-p*.

1 — кольцевой контакт и вывод базы. *2* — *p*-область (эмиттер); *3* — слой *n*; *4* — слой *i*; *5* — *p*-область (коллектор).

Дрейфовые транзисторы (с двухслойной базой) или, как их еще иногда называют, транзисторы типов *p-n-i-p* и *n-p-i-n*, представляют собой приборы с неоднородной базой. Схематическая конструкция такого транзистора показана на рис. 4. Его база состоит из двух слоев, причем слой, прилегающий к эмиттеру, имеет высокую концентрацию примесей, обеспечивающую его малое сопротивление. Второй слой, прилегающий к коллектору, имеет в несколько раз бо́льшую толщину и обладает проводимостью, близкой к собственной проводимости германия (*i*-слой). В такой конструкции удачно обеспечивается уменьшение сопротивления базы и емкости коллектора при одновременном увеличении пробивного напряжения коллекторного перехода.

Для изготовления дрейфового транзистора (например, типа *p-n-i-p*) используют

пластинку германия с высоким удельным сопротивлением (порядка 20—25 *ом · см*). Путем диффузии сурьмы на глубину 10—20 *мк* на пластинке образуются низкоомные слои с проводимостью типа *n*. С одной стороны пластинки такой низкоомный слой сошлифовывается, и затем с обеих сторон пластинки вплавляются акцепторные вещества (чаще всего индий), образующие эмиттер и коллектор триода.

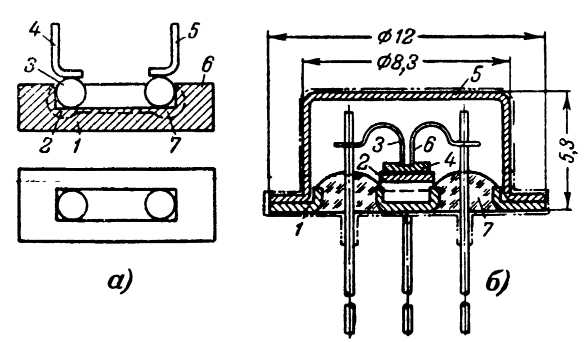


Рис. 5. Диффузионные транзисторы типов П402 и П403.

а — схематическая конструкция (*1* — коллекторная область; *2* — базовая область; *3* — сплав индия, галлия, сурьмы и золота; *4* — вывод эмиттера; *5* — вывод базы; *6* — германий типа *p*; *7* — германий типа *n*); *б* — конструктивное оформление (*1* — фланец; *2* — кристаллодержатель; *3* — вывод эмиттера; *4* — кристалл германия; *5* — колба; *6* — вывод базы; *7* — изолятор).

Граничная частота дрейфовых транзисторов достигает нескольких сотен мегагерц, что делает принципиально возможным их применение в схемах вычислительных машин с весьма высокой тактовой частотой.

Диффузионные транзисторы, у которых базовый слой создается путем диффузии примесей из газовой, жидкой или твердой среды, получили в настоящее время достаточно широкое распространение. В частности, в нашей стране разработаны и изготовляются диффузионные транзисторы типов П402, П403 и П411.

На рис. 5 показаны схематическая и реальная конструкции диффузионных транзисторов типов П402 и П403. База транзистора образуется диффузией сурьмы в германиевую пластинку из шарика сплава индия, галлия, сурьмы и золота, а эмиттер — вплавлением индия и галлия. Коллектором является германий с проводимостью типа *p* в той части пластинки, куда не успела проникнуть сурьма за счет диффузии.

Полученные таким образом транзисторы имеют переходы типа *p-n-p* и могут генерировать частоты до 60 *Мгц* (П402) и до 120 *Мгц* (П403). Для работы на более высоких частотах применяются диффузионные приборы коаксиальной конструкции. Так, коаксиальный диффузионный транзистор П411 предназначен для генерирования на частотах до 500 *Мгц*.

Канальные транзисторы представляют собой приборы, в которых носители тока движутся в сильных электрических полях, создаваемых приложенным к прибору внешним напряжением. Это движение совершается вдоль полупроводникового канала, сопротивление которого изменяется под влиянием другого электрического поля, направленного поперек канала.

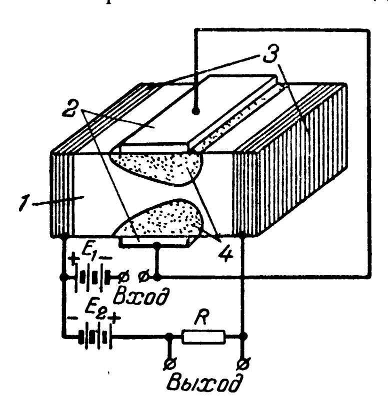


Рис. 6. Канальный транзистор.
1 — пластина германия с проводимостью типа *n*; *2* — область с проводимостью типа *p*; *3* — омические контакты; *4* — запорные слои.

Действие канального транзистора поясняется его схематической конструкцией, изображенной на рис. 6. Основой прибора является пластинка германия *1* с проводимостью типа *n*, ограниченная по сторонам омическими контактами *3*. На верхней и нижней гранях противоположно друг другу путем вплавления или другим способом созданы области *2* с дырочной проводимостью (типа *p*), которые электрически соединены между собой и носят название з а т в о р а. На границах между областями *p* и *n* образуются запорные слои *4*, в которых носители тока практически отсутствуют. Вследствие этого ток между омическими контактами, обусловленный приложенным напряжением от источника E_2, может протекать не по всему сечению пластинки, а лишь по проводящему каналу, заключенному между запорными слоями.

Сечение этого проводящего канала в свою очередь может изменяться под влиянием изменения отрицательного относительно пластины напряжения, подаваемого на затвор от источника E_1. При повышении этого напряжения происходит «подзапирание» *p-n*-перехода, сопровождающееся увеличением толщины запорных слоев, и сечение канала

уменьшается. При уменьшении отрицательного напряжения на затворе толщина запорных слоев уменьшается, и сечение канала увеличивается.

Так как сопротивление, оказываемое прибором току, протекающему от источника E_2, определяется сечением канала, то, изменяя напряжение на затворе за счет подаваемого на вход схемы переменного напряжения сигнала, можно управлять величиной тока (от источника E_2), протекающего по цепи, которая включает канал между омическими контактами и сопротивлением нагрузки R. При этом будет изменяться соответственно и падение напряжения на нагрузке, которое может быть снято с выходных зажимов схемы.

При достаточно большой величине отрицательного напряжения на затворе сечение канала может быть уменьшено до нуля, в результате чего произойдет запирание канала или отсечка тока в основной цепи схемы.

Таким образом, канальный триод ведет себя подобно электровакуумному триоду, причем роль катода выполняет один из омических контактов, который называют источником, а роль анода — другой омический контакт, так называемый сток. Затвор при этом является аналогом управляющей сетки, источники питания E_1 и E_2 играют соответственно роль сеточного смещения и анодного напряжения, а подаваемое на вход напряжение — роль возбуждения на сетку.

Для получения эффекта усиления в таком приборе желательно, чтобы основная пластинка была изготовлена из германия типа *n* с достаточно малой электропроводностью.

В соответствии с теоретическими расчетами граничная частота канальных транзисторов может быть доведена до 10^9 *гц*. Важными их достоинствами являются также высокие входное и выходное сопротивления и большая мощность, достигающая нескольких ватт. Практические образцы канальных транзисторов работают на частотах порядка нескольких десятков мегагерц.

Одним из вариантов конструкции канального транзистора является так называемый текнетрон. Он представляет собой цилиндрический стержень из германия с проводимостью типа *n*, имеющий длину 2 и диаметр 0,5 *мм*. Посредине стержня имеется кольцевая проточка, на поверхность которой электролитическим способом нанесен поясок из индия, играющий роль затвора.

Спасистор (полупроводниковый прибор с запертым *р-п*-переходом). Схематическая конструкция и схема включения спасистора показаны на рис. 7. В спасисторе используется возможность усиления за счет ввода носителей в область электрического поля и изменения числа этих носителей при помощи входного сигнала.

Спасистор представляет собой полупроводниковый диод с одним электронно-дырочным переходом, причем источник напряжения в основной цепи с сопротивлением нагрузки включен так, что диод находится в нормально закрытом состоянии. Поэтому спасистор и называют еще прибором

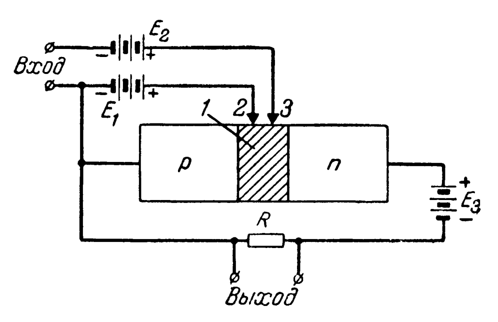


Рис. 7. Схема включения спасистора.
1 — запорный слой; *2* — эмиттер (инжектор); *3* — модулятор.

с закрытым *р-п*-переходом. Однако если в обычном диоде электронно-дырочный переход является неуправляемым, то в спасисторе осуществляется управление этим переходом, реализуемое при помощи двух дополнительных электродов. Один из них, который носит название эмиттера или инжектора, имеет потенциал более низкий, чем потенциал запорного слоя, и служит для этого слоя источником дополнительных электронов. Другой электрод носит название модулятора и служит для управления током, протекающим через спасистор. Он также расположен в области запорного слоя, и создавая дополнительное электрическое поле, модулирует поток электронов, обусловливая изменения тока в нагрузке (а значит, и напряжения на выходных зажимах), соответствующие напряжению, подаваемому на вход схемы.

Таким образом, спасистор может работать в качестве усилителя, причем разработаны типы спасисторов с граничной частотой до 10 *Ггц*, пригодные для работы при температуре до 500° С.

7. ТУННЕЛЬНЫЙ ДИОД

Большие перспективы в области создания электронных машин со скоростью работы порядка миллионов и десятков миллионов операций в секунду открывает применение созданных в Японии туннельных диодов.

В этих диодах, изготовляемых из германия или кремния, используется так называемый туннельный эффект, который заключается в том, что вследствие волновых свойств материи электроны могут проникать через барьеры, непроницаемые для обычных классических частиц.



Рис 8. Вольт-амперная характеристика туннельного диода.

Благодаря действию туннельного эффекта при нарастании напряженности поля в пределах 10^5—10^6 *в/см* в диоде происходит весьма резкий пробой, который наблюдается во всей области отрицательных напряжений и лишь на определенном участке положительных напряжений, приложенных к диоду.

Физические явления, имеющие место в туннельном диоде, обусловливают форму его вольт-амперной характеристики, подобную изображенной на рис. 8. Эта характеристика снята на постоянном токе для германиевого диода, изготовленного путем вплавления таблетки индия с небольшой примесью галлия и цинка в пластинку германия с удельным сопротивлением 10^{-3} *ом · см*, содержавшего примесь мышьяка.

Как следует из характеристики, сопротивление диода при отрицательном смещении невелико, причем с ростом напряжения ток через диод монотонно нарастает. При подаче же на диод положительного напряжения ток вначале возрастает до острого максимума, затем падает до глубокого и широкого минимума и лишь после этого начинает монотонно возрастать при дальнейшем увеличении напряжения. Штриховая прямая, проведенная на рис. 8, представляет собой касательную к участку вольт-амперной характеристики, соответствующему наиболее крутому спаду тока. Величина, обратная тангенсу наклона этой прямой, представляет собой, очевидно, отрицательное сопротивление диода на данном участке его вольт-амперной характеристики.

Наличие у туннельного диода отрицательного сопротивления указывает на возможность использования его в схемах, предназначенных для генерирования электрических колебаний. В связи с тем, что туннельный эффект не связан с ограниченным временем дрейфа неосновных носителей в полупроводнике, оказывается возможной работа прибора на весьма высоких частотах. Экспериментальными исследованиями установлена возможность использования туннельных диодов на частотах порядка сотен и даже тысяч мегагерц.

Как далее следует из характеристики, диод является сильноточным и низковольтным элементом. При достаточно большой площади максимальный ток в опытных образцах германиевых туннельных диодов достигал 2,5 *а*, а в кремниевых 0,5 *а* при напряжениях порядка долей вольта. Таким образом, потери энергии в туннельных диодах весьма незначительны.

Очень важным свойством туннельных диодов является также весьма широкий температурный диапазон, в котором сохраняется падающий участок их вольт-амперной характеристики. В процессе экспериментов с кремниевыми диодами установлено, что у них сохранялось отрицательное сопротивление от 4,2° K (температура жидкого гелия) до 350—375° C. Наконец, выявлена устойчивость работы туннельных диодов при наличии ядерных излучений, что делает особенно важным их применение для повышения надежности электронных устройств специального назначения.

Кроме генерирования колебаний сверхвысоких частот, туннельные диоды могут применяться также в качестве детекторов, ограничителей, мультивибраторов, работающих

в режиме переключения бистабильных элементов запоминающих устройств и т. п.

Рассмотрим работу туннельного диода в режиме переключателя более подробно. На рис. 9,*а* изображена схема

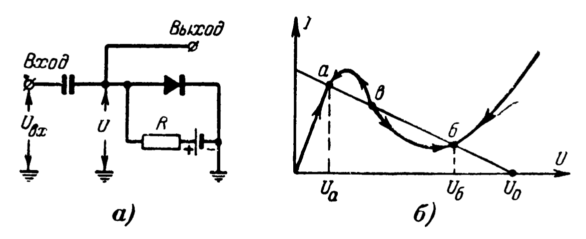


Рис. 9. Схема использования туннельного диода в режиме переключения (*а*) и графики зависимостей между токами и напряжениями в этой схеме (*б*).

включения диода в режиме переключения, а на рис. 9,*б* приведен график, характеризующий зависимость между токами и напряжениями в схеме.

Напряжение U на диоде относительно «земли» при напряжении источника смещения U_0 и токе I в цепи, включающей этот источник, диод и постоянное сопротивление R, будет:

$$U = U_0 - IR,$$

откуда

$$I = \frac{1}{R} U_0 - \frac{1}{R} U.$$

Это выражение представляет собой уравнение прямой, отсекающей на осях абсцисс и ординат соответственно отрезки $U = U_0$ и $I = \frac{U_0}{R}$, а точки пересечения *а*, *б* и *в* этой прямой с вольт-амперной характеристикой диода являются точками, характеризующими одно из трех возможных устойчивых состояний данной схемы.

Однако, если проанализировать процессы в схеме, то можно убедиться, что устойчивым являются только два из этих трех возможных состояний схемы, а именно состояния, характеризующиеся точками *а* и *б*. В самом деле, если схема находится в состоянии, соответствующем точке *в*, то любое изменение тока в ней будет вызывать изменение напряжения, способствующее изменению тока в том же направлении, и схема перейдет либо в устойчивое состояние *а* (когда начальным толчком явилось увеличение

тока I или уменьшение напряжения U), либо в устойчивое состояние *б* (когда начальным толчком явилось уменьшение тока I или увеличение напряжения U).

Рассмотрим временные диаграммы работы описываемой схемы, представленные на рис. 10. Пусть начальное состояние схемы характеризуется точкой *а* (рис. 9,*б*). При этом на выходе схемы имеет место малое напряжение U_a. В момент времени t_1 на вход схемы поступает положительный импульс, который перебрасывает схему во второе устойчивое состояние, характеризующееся точкой *б*. При этом напряжение на выходе схемы достигнет большей величины $U_б$, и это новое состояние схемы будет сохраняться до тех пор, пока в некоторый момент времени t_2 на вход не поступит отрицательный импульс, возвращающий схему в начальное состояние. Время переброса схем на туннельных диодах может составлять единицы или даже доли наносекунд.

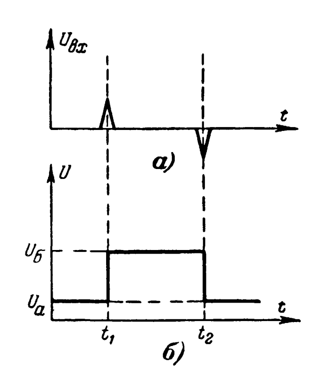


Рис. 10. Временные диаграммы работы туннельного диода в режиме переключения.
а — сигнал на входе; *б* — сигнал на выходе.

Имеются сообщения о том, что в ряде стран (Японии, США, Англии) ведутся перспективные разработки по созданию электронных вычислительных машин на туннельных диодах. Предполагается, что эти машины будут обладать весьма высоким быстродействием и надежностью работы в широком диапазоне температур.

Глава третья

НОВЫЕ ФЕРРОМАГНИТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

8. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

Широкое применение ферромагнитных элементов в вычислительных машинах началось с середины 50-х годов, когда удалось сконструировать надежные, быстродействующие, экономичные и малогабаритные запоминающие устройства на ферритовых сердечниках с прямоугольной петлей гистерезиса.

Наибольшее распространение получили тороидальные сердечники из ферритов или оксиферов, представляющих собой комплексные металлические окислы (соли железной кислоты) с общей химической формулой вида $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me — двухвалентный металл. Для изготовления элементов запоминающих устройств широко применяются магний-марганцевые ферриты, химический состав которых выражается формулой $MgO \cdot MnO \cdot Fe_2O_3$. Форма петли гистерезиса таких ферритов близка к прямоугольной.

Ферритовые сердечники применяются не только в качестве элементов запоминающих устройств, но и для конструирования сдвигающих регистров и различных логических схем.

В нашей стране создано несколько типов вычислительных машин, в которых ферритовые тороидальные сердечники являются основными элементами арифметических, управляющих и запоминающих устройств. К таким машинам относятся, например машина ЛЭМ-1, созданная в Лаборатории электромоделирования АН СССР, и машина «Сетунь», построенная в Московском государственном университете.

Однако при применении очень большого числа сердечников, в частности в запоминающих устройствах большой емкости, возникают серьезные трудности технологического характера, связанные с изготовлением и отбраковкой сотен тысяч отдельных сердечников очень малых размеров, монтажом запоминающих плат, прошивкой сердечников проводами и т. д.

Для того чтобы ускорить процессы перемагничивания сердечников и сократить расход необходимой для этого энергии, а также для уменьшения общих размеров устройства, стремятся к максимальному уменьшению размеров сердечников. Однако производство ферритовых колец с внешним диаметром менее 1 *мм* связано со значительными трудностями, которые особенно возрастают при высоких требованиях к идентичности параметров сердечников.

Монтаж сердечников при современном уровне техники весьма трудно поддается механизации, и поэтому изготовление устройств с большим числом миниатюрных сердечников оказывается исключительно трудоемким и дорогим процессом, дающим большой процент брака.

Перечисленные трудности привели к поискам новых типов ферромагнитных элементов, которые, сохраняя ценные

свойства ферритовых сердечников, были бы более технологичными, экономичными, позволяли бы работать с большей скоростью и давали бы возможность применять их в качестве логических элементов и для других целей.

Естественно, что трудно требовать создания элементов, которые полностью сочетали бы в себе все перечисленные качества, поэтому в результате интенсивной работы ученых, исследователей и конструкторов в течение последних 5 лет появился целый ряд новых разработок ферромагнитных элементов вычислительной техники, таких как многоотверстные сердечники (трансфлюксоры), ферритовые пластины, тонкие ферромагнитные пленки, твисторы и т. п.

9. ТРАНСФЛЮКСОРЫ

Общие сведения о трансфлюксорах. Разнообразные логические и запоминающие элементы могут быть созданы на ферритовых сердечниках с двумя или несколькими отверстиями. Впервые такие элементы были описаны в 1955—1956 гг. Райхманом и Лоу, причем авторы назвали их трансфлюксорами (от латинской приставки «транс», обозначающей «через», «пере» и слова «флюксус» — «течение», «поток»). Таким образом, название показывает, что этот прибор основан на перераспределении магнитного потока в отдельных участках сложного магнитопровода, создающегося в многоотверстном сердечнике. Управление распределением потока в таком магнитопроводе возможно путем пропускания токов по обмоткам, проходящим через отверстия трансфлюксора.

В настоящее время наиболее широко известны трансфлюксоры с двумя отверстиями. Рассмотрим принцип действия элементов с разветвленным магнитопроводом на примере такого трансфлюксора.

Простейший трансфлюксор, изображенный на рис. 11, представляет собой сердечник, изготовленный из феррита с прямоугольной петлей гистерезиса, имеющий два круглых отверстия различного диаметра. В магнитопроводе можно выделить три участка: *1*, *2* и *3*. Пусть площади поперечного сечения участков *2* и *3* одинаковы, а площадь поперечного сечения участка *1* больше суммы площадей поперечных сечений участков *2* и *3*. По закону Кирхгофа для магнитной цепи магнитный поток Φ_1 в сечении *1* будет равен алгебраической сумме потоков $\Phi_2+\Phi_3$ в сечениях *2* и *3*.

Условимся считать начальным состоянием сердечника состояние намагниченности до насыщения в направлении часовой стрелки. Сердечник может быть приведен в начальное состояние пропусканием импульса тока соответственного направления и достаточной величины через обмотку W_1. Вследствие прямоугольности петли гистерезиса материала сердечника это состояние намагниченности сохраняется в сердечнике и после прекращения действия импуль-

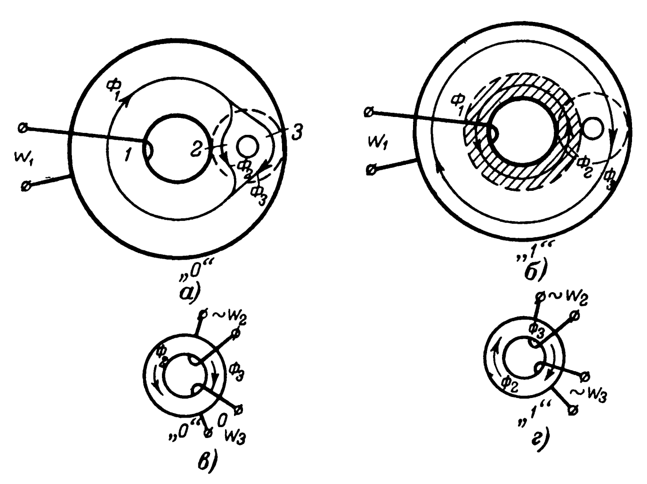


Рис. 11. Принцип действия трансфлюксора с двумя отверстиями.

а — трансфлюксор в начальном (запертом) состоянии; *б* — трансфлюксор в рабочем (открытом) состоянии; *в* — область вокруг малого отверстия у запертого трансфлюксора; *г* — область вокруг малого отверстия у открытого трансфлюксора.

са. Условимся, что описанному начальному состоянию сердечника соответствует запись в нем информации «0» (рис. 11,*а*).

Для того чтобы перевести сердечник в другое устойчивое состояние, соответствующее записи в нем «1», пропустим через обмотку так называемый **установочный** или **отпирающий** импульс такой величины, которая обеспечила бы перемагничивание в противоположном направлении не всего сердечника, а лишь короткого участка магнитопровода, изображенного в виде заштрихованного кольца, прилегающего к большому отверстию. Это кольцо включает в себя правую часть сечения участка *1* и все сечение участка *2*. В результате распределение потоков в сердечнике будет таким, как показано на рис. 11,*б*, причем

потоки Φ_2 и Φ_3 по сторонам малого отверстия будут направлены в противоположные стороны.

Рассмотрим теперь круговую зону вокруг малого отверстия. Очевидно, ее можно представить как отдельный кольцевой сердечник, намагниченный до насыщения, причем в начальном состоянии трансфлюксора магнитные потоки в обоих полукольцах этого сердечника направлены навстречу друг другу (рис. 11,*в*), а в рабочем состоянии, соответствующем записи в трансфлюксоре единицы, магнитный поток замыкается в кольце по часовой стрелке (рис. 11,*г*).

Пропустим через малое отверстие две обмотки и в одну из них, так называемую запрашивающую обмотку W_2, подадим переменный ток с такой амплитудой, которая была бы достаточна для изменения кольцевой зоны вокруг малого отверстия, но мала для перемагничивания всего сердечника. Тогда в другой обмотке W_3, которая носит название выходной, сколько-нибудь значительная э. д. с. будет индуктироваться лишь в том случае, если трансфлюксор находится в рабочем состоянии.

Объясняется это тем, что когда трансфлюксор находится в начальном состоянии, м. д. с., создаваемая переменным током, протекающим через запрашивающую обмотку, в один полупериод будет совпадать с магнитным потоком Φ_1 в левом полукольце, а во второй полупериод — с потоком Φ_2 в правом полукольце. Так как потоки Φ_1 и Φ_2 являются потоками насыщения, то дальнейшее их увеличение под влиянием тока запрашивающей обмотки невозможно, и в выходной обмотке э. д. с. индуктироваться не будет.

В трансфлюксоре, находящемся в рабочем состоянии, в один полупериод переменного тока, когда м. д. с. совпадает по направлению с магнитным потоком, последний ввиду насыщения нарастать также почти не будет. Во второй полупериод, когда м. д. с. направлена навстречу потоку, она будет уменьшать его или даже перемагничивать зону вокруг малого отверстия. В следующий полупериод будет восстанавливаться прежнее состояние насыщения и т. д. При этих изменениях магнитного потока в выходной обмотке индуктируется э. д. с. и, таким образом, в трансфлюксоре оказывается возможным осуществлять запоминание и «неразрушающее» считывание зафиксированной информации.

Практически считывать информацию с трансфлюксора целесообразнее не синусоидальным переменным током,

а знакопеременными несимметричными импульсами. Дело в том, что в случае применения переменного тока приходится ограничивать его амплитуду, так как при действии полуволны тока, создающей м. д. с., направленную против часовой стрелки, может произойти ответвление потока в участок *1* магнитопровода, и если трансфлюксор находился в запертом состоянии, то может произойти полное или частичное изменение потока Φ_1, нарушающее зафиксированное в нем устойчивое состояние. Это явление носит название разблокировки трансфлюксора, т. е. нарушения запертого—блокированного его состояния в результате считывания информации.

При считывании информации знакопеременными импульсами одни из них, создающие поле, направленное по часовой стрелке, имеют относительно большую амплитуду и носят название приводных импульсов, а другие, с меньшей амплитудой, действующие в противоположном направлении, называются подготавливающими импульсами.

В запертом трансфлюксоре ни приводные, ни подготавливающие импульсы не изменяют сколько-нибудь заметно магнитный поток в зоне вокруг малого отверстия и, следовательно, не индуктируют э. д. с. в выходной обмотке. В открытом же трансфлюксоре подготавливающие импульсы с ограниченной амплитудой перемагничивают зону вокруг малого отверстия, но не влияют на поток в сечении *1*. Последующие приводные импульсы вследствие большой амплитуды обеспечивают форсированное перемагничивание этой зоны в прежнее состояние, причем в выходной обмотке индуктируются достаточно мощные сигналы считывания информации.

Кроме описанного применения, трансфлюксор можно использовать и как элемент, запоминающий в пределах некоторого диапазона уровень установочного или отпирающего импульса (рис. 12). Таким образом, трансфлюксор может быть использован и в схемах, работающих по моделирующему или количественному принципу. От амплитуды отпирающего импульса в обмотке W_1 зависит ширина перемагничиваемой им заштрихованной зоны вокруг большого отверстия. Следовательно, при малой амплитуде отпирающих импульсов изменяется направление не всего потока Φ_2, а лишь некоторой его части, причем величина этой реверсированной части потока Φ_2 определяется амплитудой отпирающего импульса.

Так как величина э. д. с., индуктированной в выходной обмотке, определяется непосредственно величиной реверсированной части потока Φ_2 (при постоянной амплитуде запрашивающего напряжения, подводимого к обмотке W_2), то, очевидно, напряжение на зажимах выходной обмотки при считывании будет зависеть от амплитуды отпирающего импульса, которая как бы запоминается трансфлюксором.

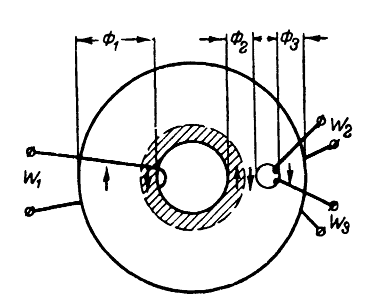


Рис. 12. Схема запоминания уровня отпирания в трансфлюксоре.

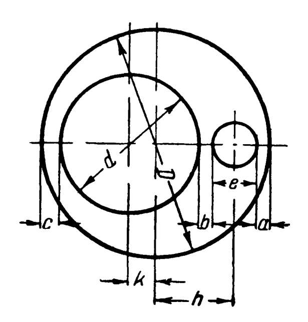


Рис. 13. Конфигурация и соотношения размеров реального трансфлюксора.

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проводившихся в Институте точной механики и вычислительной техники АН СССР, были определены наиболее выгодные конфигурация и соотношения размеров двухотверстных трансфлюксоров, работающих в схемах запоминающих устройств, в которых для выбора запоминающих элементов используется принцип совпадения двух токов.

Конфигурация такого трансфлюксора изображена на рис. 13, а соотношения его размеров могут быть определены из следующих выражений:

$$D = nd;\quad e = \frac{n-1}{2n-1}d;\quad c = \frac{(n-1)^2}{2n-1}d;$$

$$a = b = \frac{(n-1)^2}{2(2n-1)}d;\quad k = \frac{n-1}{2(2n-1)}d;$$

$$h = \frac{n^2}{2(2n-1)}d.$$

В этих выражениях все размеры трансфлюксора могут быть определены через диаметр большого отверстия d и коэффициент n, представляющий собой отношение диаметра

всего трансфлюксора к диаметру большого отверстия ($n=D/d$). Этот коэффициент рекомендуется выбирать в пределах 1,5—1,75. Размер k представляет собой расстояние между геометрическим центром трансфлюксора и центром большого отверстия, а h — расстояние между геометрическим центром трансфлюксора и центром его малого отверстия.

В случае использования метода считывания, отличающегося от метода совпадения токов, соотношения геометрических размеров трансфлюксора в зоне малого отверстия могут быть несколько иными при сохранении того же общего размера этой зоны.

По приведенным формулам были рассчитаны и изготовлены из феррита марки К-28 трансфлюксоры, которые после отжига имели следующие размеры. $D=3{,}6$ *мм*, $d=2{,}4$ *мм*, $e=0{,}6$ *мм*, $a=b=0{,}15$ *мм*, $c=0{,}3$ *мм*. При испытании этих трансфлюксоров применялись токи блокировки и разблокировки величиной до 1 *а*, синусоидальный ток считывания имел амплитуду 300 *ма*; при считывании разнополярными импульсами амплитуда положительного импульса выбиралась равной 1,6 *а*, а отрицательного импульса 0,3 *а*. При этом в одновитковой выходной обмотке индуктировалась э. д. с. считывания порядка 0,35 *в*.

Применение трансфлюксоров в схемах запоминающих устройств. Как уже упоминалось, одним из возможных применений трансфлюксоров в вычислительной технике является создание на них оперативных матричных запоминающих устройств, работающих по методу совпадения двух токов. Схема такого устройства приведена на рис. 14.

Адресные или селектирующие шины записи X и Y пронизывают большие отверстия трансфлюксоров, расположенных в узлах матрицы. Для записи «0» в соответствующую пару взаимно-перпендикулярных шин записи подаются блокировочные или запоминающие импульсы тока такой величины, чтобы только сумма создаваемых ими м. д. с. в находящемся на их пересечении избранном сердечнике могла вызвать его полное перемагничивание. Для записи «1» в соответствующую пару шин подаются установочные или отпирающие импульсы тока противоположного знака и соответствующей величины, необходимой для отпирания трансфлюксора.

Считывание информации осуществляется подачей запрашивающих (подготавливающего и приводного) импульсов в соответствующие адресные шины считывания X и Y, про-

ходящие через малые отверстия трансфлюксоров. При этом в избранном трансфлюксоре, находящемся на пересечении возбужденных адресных шин, если в нем была записана «1» (т. е. если он был открыт), происходит двукратное перемагничивание зоны вокруг малого отверстия, в результате чего в проводе считывания, пронизывающем малые отверстия всех сердечников матрицы, индуктируется сигнал считывания.

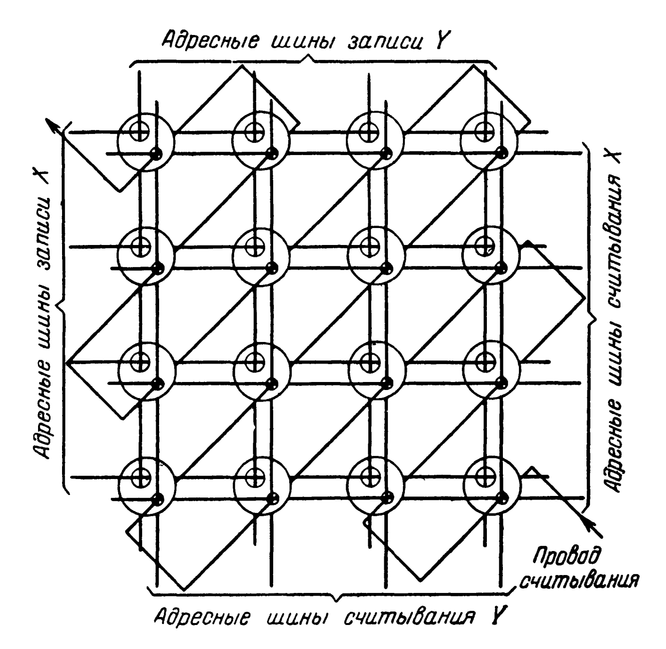


Рис. 14. Матричное оперативное запоминающее устройство на трансфлюксорах.

В описанной схеме имеется возможность одновременного независимого возбуждения двух различных пар адресных шин записи и считывания, так как они не связаны между собой общими магнитопроводами. Это позволяет осуществлять одновременно и независимо друг от друга запись и считывание информации по двум разным адресам, что является весьма существенным преимуществом описываемой схемы, дополняющим другое ее важное преимущество — сохранение информации при считывании.

Рассмотрим еще один из вариантов применения трансфлюксоров для построения схем долговременных запоми-

нающих или, как их еще называют, задающих устройств. Предположим, что поставлена задача создать задающее устройство, в котором можно было бы хранить любую из нескольких постоянных программ. Для этой цели можно применить схему, изображенную на рис. 15.

В этой схеме через большие отверстия всех трансфлюксоров проходит общий провод блокировки, по которому от

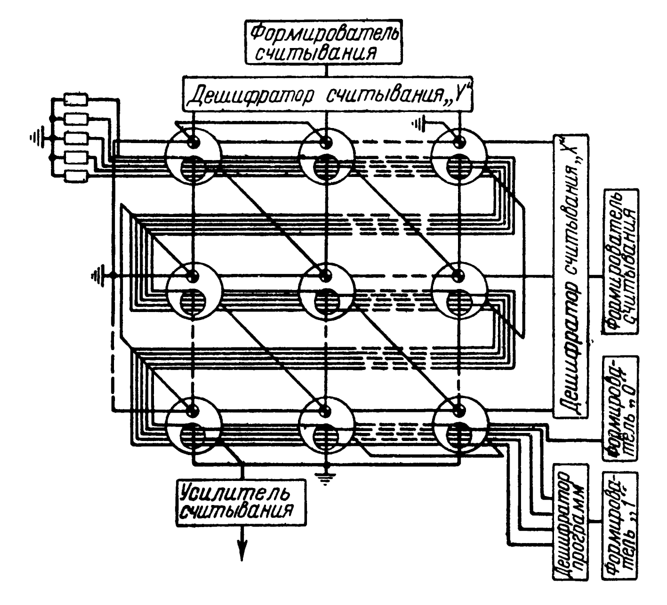


Рис. 15. Долговременное запоминающее устройство на трансфлюксорах.

формирователя «0» подается импульс тока блокировки, запирающий все трансфлюксоры, т. е. гасящий информацию, которая была записана в матрице задающего устройства во время предыдущего цикла записи.

Кроме того, от дешифратора программ к матрице подводится столько проводов разблокировки, сколько программ необходимо записывать в задающем устройстве. В изображенной на рис. 15 матрице можно записать одну из четырех различных программ. Каждый из проводов разблокировки пронизывает большие отверстия только тех трансфлюксоров, в которых при записи данной программы должна быть зафиксирована «1». Соответствующий провод разблокировки выбирается дешифратором программ, через

который в матрицу и поступают импульсы разблокировки, вырабатываемые формирователем «1». Во все провода разблокировки и в провод блокировки включены дополнительные сопротивления для выравнивания нагрузок формирователей тока.

Число программ, которые могут быть записаны в рассматриваемой схеме, определяется в основном диаметром большого отверстия.

Считывание информации, записанной в матрице, осуществляется последовательной посылкой запросных импульсов во все трансфлюксоры путем возбуждения их от формирователей через дешифраторы считывания «*X*» и «*Y*». Соответствующие шины запроса пропущены через малые отверстия трансфлюксоров и в разблокированном состоянии избранного трансфлюксора в выходной обмотке, пропущенной через малые отверстия всех трансфлюксоров, индуктируется выдаваемый импульс считывания.

Логические схемы на многоотверстных трансфлюксорах. Как известно, на магнитных сердечниках могут строиться различные логические схемы. Однако в большинстве случаев для выполнения даже относительно простых логических операций схемы содержат по нескольку магнитных сердечников, объединенных при помощи цепей связи. Недостатком таких схем, кроме их сложности, является также значительная затрата энергии, расходуемой на перемагничивание сердечников и на компенсацию потерь в цепях связи. Одним из путей преодоления этих недостатков может быть использование в качестве логических элементов трансфлюксоров с числом отверстий больше двух.

На рис. 16 изображен трансфлюксор с тремя отверстиями *А*, *Б* и *В*, расположенными в один ряд. Такой трансфлюксор можно использовать как схему совпадения с двумя входами *I* и *II*, срабатывающую только при поступлении сигналов на эти входы в определенной последовательности.

При подаче импульса сброса или блокировки все участки магнитной цепи трансфлюксора намагничиваются до насыщения так, как показано на рис. 16,*б*. Такое состояние трансфлюксора является исходным, причем в этом состоянии зоны вокруг отверстий *Б* и *В* заблокированы потому, что магнитные потоки по сторонам этих отверстий направлены навстречу друг другу и сигнал *II* не может повлиять на величину потока вокруг отверстия *Б*, а подготавливающие и приводные импульсы не влияют на величину

потока вокруг отверстия *В*. Поэтому в выходной обмотке сигнал отсутствует.

Зона вокруг отверстия *А* в исходном положении трансфлюксора, очевидно, не заблокирована, и при поступлении сигнала *I* происходит реверсирование потока на участке *2* и частично на участке *1*. Состояние трансфлюксора после воздействия сигнала *I* показано на рис. 16,*в*. Если теперь к трансфлюксору будет подведен сигнал *II*, то под его воз-

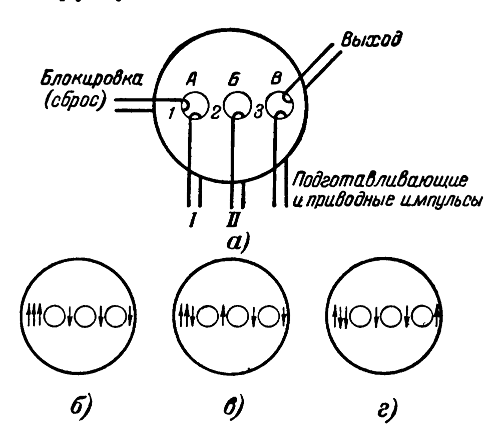


Рис. 16. Трансфлюксор с тремя отверстиями, работающий как схема совпадений.

а — схема размещения отверстий; *б* — распределение потоков в исходном состоянии (после осуществления сброса); *в* — то же после воздействия сигнала *I*; *г* — то же после воздействия сигнала *II*

действием произойдет реверсирование потока вокруг отверстия *Б*, и трансфлюксор придет в состояние, характеризуемое распределением потоков, изображенным на рис. 16,*г*. При этом разблокируется зона вокруг отверстия *В*, и при воздействии подготовительных и приводных импульсов в выходной обмотке будут индукгироваться сигналы считывания информации.

Таким образом, сигнал на выходе описанного трансфлюксора появляется лишь в том случае, если к нему поступили два входных сигнала *I* и *II*, причем обязательно в такой последовательности: сначала должен поступить сигнал *I*, а затем сигнал *II*. В случае отсутствия одного или обоих входных сигналов, а также при нарушении указанного порядка их следования сигнал на выходе транс-

флюксора будет отсутствовать, несмотря на возбуждение его запрашивающими импульсами (подготовительными и приводными).

Рассмотрим теперь работу трансфлюксора с пятью отверстиями, изображенного на рис. 17, который может выполнять функции схемы совпадения с четырьмя входами. Здесь имеются четыре управляющих удлиненных отверстия *А*, *Б*, *В* и *Г*, магнитное состояние зон вокруг которых определяется входными сигналами. Пятое отверстие *Д* используется для считывания информации с трансфлюксора, и поэтому через него проходят запросная и выходная обмотки.

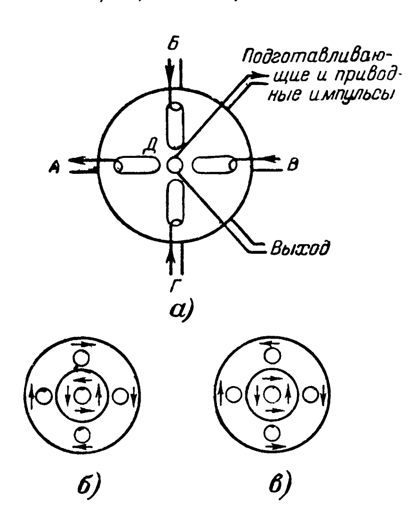


Рис. 17. Трансфлюксор с пятью отверстиями, работающий как схема совпадения.

а — схема; *б* — распределение потоков в состоянии пропускания; *в* — то же в состоянии запирания.

Если на входы трансфлюксора поступили все четыре сигнала одного и того же знака, безразлично в каком порядке, то все участки магнитных зон вокруг входных отверстий, прилегающие к центральному отверстию *Д*, намагнитятся в одном направлении, в результате чего выходная зона вокруг центрального отверстия окажется в разблокированном состоянии (рис. 17,*б*) и при поступлении запрашивающих импульсов в выходной обмотке будут индуктироваться сигналы считывания.

Если же хотя бы один из входных сигналов имел обратное направление (рис. 17,*в*), то соответствующий участок магнитной зоны вокруг одного из удаленных отверстий также будет намагничен в обратном направлении, и несмотря на воздействие подготавливающих и приводных импульсов, в выходной обмотке сигналы считывания индуктироваться не будут.

Дальнейшим развитием принципа перераспределения потоков в многоотверстных сердечниках являются разработки разнообразных логических схем на так называемых «лесенках», т. е. структурах, состоящих из боковых сте-

нок и перекладин или ступенек, разделяющих отверстия.

Действие такой структуры рассмотрим на примере восьмиступенчатой лесенки, изображенной на рис. 18.

Работа лесенки основана на применении законов Кирхгофа для магнитной цепи, а именно на свойстве магнитного потока замыкаться по пути, представляющему для него наименьшее сопротивление, т. е. при однородном материале — по кратчайшему пути.

Первая перекладина лесенки охвачена витками обмотки, в которую подаются синхронизирующие импульсы тока; последнюю (в данном случае восьмую) перекладину охватывает выходная обмотка. На боковых стенках отверстий *а*, *в*, *д*, и *ж* располагаются витки соединенных между

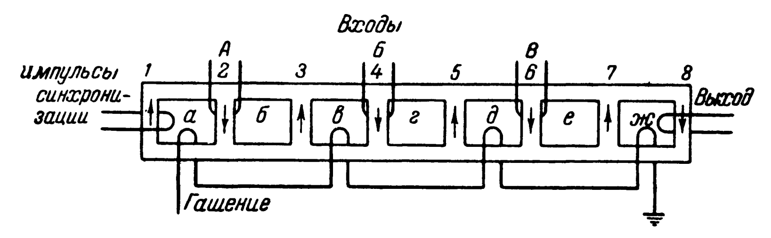


Рис. 18. Схема восьмиступенчатой лесенки.

собой последовательно обмоток, образующих цепь, в которую подаются импульсы гашения, восстанавливающие исходное или начальное состояние лесенки. Направления магнитных потоков в перекладинах в исходном состоянии показаны на рис. 18; здесь в нечетных перекладинах потоки направлены в одну (например, вверх), а в четных в другую сторону.

На всех четных перекладинах, кроме последней (в данном случае на перекладинах *2*, *4* и *6*), размещены витки входных обмоток, на зажимы которых подаются входные сигналы *А*, *Б* и *В*. В рассматриваемой схеме, представляющей собой схему совпадения (схему «И») с тремя входами, амплитуда и направление входных сигналов таковы, что соответствующие перекладины удерживаются в состоянии начального намагничивания, когда магнитный поток в этих перекладинах направлен вниз.

Поэтому, когда в обмотку, размещенную на первой перекладине, поступает синхронизирующий импульс, изменяющий в ней направление магнитного потока вниз, то силовые линии этого изменившегося потока не могут замкнуться вверх ни через перекладины *2*, *4* и *6*, заблокированные

в начальном состоянии сигналами *А*, *Б* и *В*, ни через перекладины *3*, *5* и *7*, уже намагниченные до насыщения импульсом гашения. Единственным возможным путем замыкания силовых линий магнитного потока, созданного синхронизирующим импульсом, является, таким образом, перекладина *8*, в которой магнитный поток изменяет свое направление вверх, причем в выходной обмотке индуктируется сигнал, указывающий на наличие совпадающих по времени сигналов на входах *А*, *Б* и *В*.

Описанный процесс реверсирования магнитного потока в перекладине *8* будет иметь место только при наличии на всех входах достаточных по величине сигналов, блокирующих изменение начального состояния предшествующих четных перекладин. Если хотя бы на одном входе сигнал отсутствует, то соответствующая этому входу перекладина получает возможность перемагнититься, магнитный поток, созданный синхронизирующим импульсом, замыкается через нее и, следовательно, последняя перекладина не перемагничивается и в выходной обмотке сигнал считывания не индуктируется.

Таким образом, схема работает как классическая схема «И», выдающая сигнал при совпадении во времени достаточных по величине сигналов на всех ее входах. Используя те же общие принципы действия схемы лесенки, можно собрать на ней схемы «ИЛИ» (собирательные) и «НЕ» (отрицания).

10. ФЕРРИТОВЫЕ ПЛАСТИНЫ

Одним из решений вопроса создания малогабаритного и экономического ферромагнитного запоминающего устройства большой емкости, обладающего преимуществами устройств на ферритовых сердечниках и в то же время лишенного их серьезных конструктивных и технологических недостатков, является применение для этой цели крупноблочных литых ферритовых пластин с обмотками, нанесенными на них методами печатного монтажа.

Для пояснения работы такого запоминающего элемента рассмотрим изображенный на рис. 19,*а* в увеличенном масштабе разрез участка ферритовой пластины с отверстиями. При прохождении тока через пропущенный сквозь отверстие провод вокруг этого провода возникает магнитное поле, напряженность которого убывает по мере удаления от провода, как это показано на рис. 19,*б*. Если пластина изготовлена из материала с прямоугольной петлей гистерезиса, то под действием этого поля вокруг отверстия

будет происходить перемагничивание кольцевой зоны с радиусом, равным такому расстоянию от проводника, при котором напряженность поля становится равной значению коэрцитивной силы H_c.

Эта перемагниченная зона имеет форму тороида с внешним радиусом r_1, внутренним радиусом r_0 и высотой h. Свойства такого тороида в значительной степени аналогичны свойствам обычных отдельных кольцевых ферритовых сердечников. Однако если в обычных сердечниках с ограниченными размерами перемагничиваемой массы феррита увеличение амплитуды перемагничивающих импульсов приводит к соответственному ускорению процессов перемагничивания, то в пластине эта почти линейная зависимость нарушается, так как с увеличением амплитуды импульса растет радиус перемагничиваемой зоны и, следовательно, значительная часть энергии импульса расходуется на перемагничивание большей массы ферромагнитного материала.

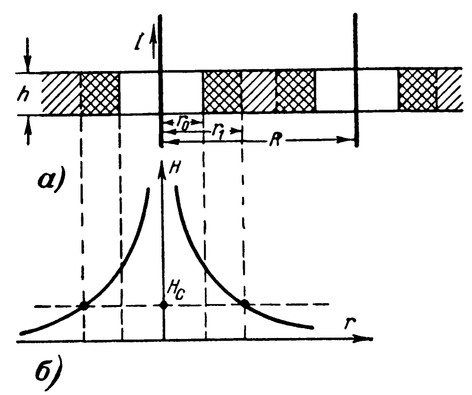


Рис. 19. Запоминающие элементы в ферритовой пластине.
а — разрез пластины; *б* — распределение напряженности поля.

Вместе с тем увеличение амплитуды перемагничивающих импульсов в пластине недопустимо из-за возникающего при этом влияния на соседние запоминающие элементы за счет захвата их зон расширяющейся зоной данного элемента.

По этой же причине недопустимо и слишком близкое расположение друг к другу запоминающих элементов. Исследованиями установлено, что взаимное влияние соседних элементов становится особенно сильным, если рассто-

яние между краями соседних отверстий меньше радиуса самих отверстий.

В литературе описано экспериментальное запоминающее устройство, построенное на ферритовых пластинах толщиной $h=0,5$ *мм*, имеющих форму квадрата 21×21 *мм*. В пластине имеется 16×16=256 отверстий диаметром 0,63 *мм* при расстоянии между центрами отверстий 1,27 *мм*.

Для считывания и записи информации на пластинах нанесена методом металлизации общая обмотка, пронизывающая все отверстия пластины. Один из способов нанесения обмотки заключается в следующем. При изготовлении пластины на обеих ее сторонах формируется сетка выступающих ребер (рис. 20), которые на лицевой и обратной сторонах сдвинуты на полшага одно относительно другого. Затем вся пластина покрывается слоем металла, после чего металлическое покрытие удаляется с ребер при помощи шлифовки. Остающаяся металлизация на поверхности пластин и внутренних стенках отверстий образует проводник, который последовательно пронизывает все отверстия пластины и далее присоединяется при помощи серебряной пасты к выводным медным проводникам.

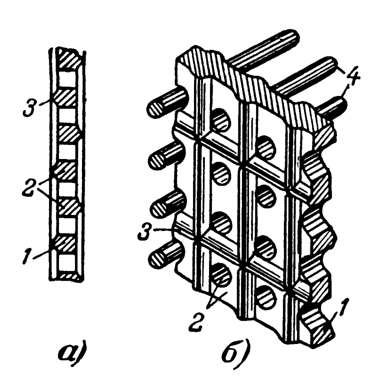


Рис. 20. Часть ферритовой пластины с металлизацией и адресными шинами.

а — поперечное сечение; *б* — общий вид

1 — ферритовая пластина; *2* — металлическое покрытие на поверхности пластины и внутри отверстий; *3* — выступающие ребра со снятым металлическим покрытием; *4* — адресные шины.

Как показал опыт, оптимальными параметрами импульсов в адресной шине являлись амплитуда тока 330 *ма* и длительность импульса 2 *мксек*. При этих условиях амплитуда сигнала считывания информации составляла около 30 *мв*. Возможно и некоторое увеличение токов перемагничивания, но во избежание взаимного влияния соседних отверстий величина этих токов не должна превышать 500 *ма*. Для токов с амплитудой более 250 *ма* время перемагничивания остается приблизительно неизменным и равным около 1,7 *мксек*.

Важное преимущество применения описанных ферритовых пластин в качестве элементов запоминающих устройств состоит в том, что при этом значительно снижа-

ется расход энергии питания (раз в пять по сравнению с наиболее экономичными устройствами на ферритовых сердечниках). За счет дальнейшего снижения размеров пластин (уменьшения их толщины и диаметра отверстий) возможна еще бóльшая экономия энергии питания и уменьшение общих размеров устройств. Однако при этом затрудняются изготовление, нанесение обмотки и монтаж пластин, а также снижается величина полезного сигнала считывания.

На описанных принципах были разработаны и построены макеты запоминающих устройств с транзисторным управлением, которые в процессе опытной эксплуатации показали вполне удовлетворительные результаты. Это позволяет предполагать, что при дальнейшем совершенствовании конструкции и технологии изготовления ферритовых пластин, а также схем их использования можно будет успешно строить быстродействующие экономичные и малогабаритные запоминающие устройства большой емкости.

11. МАГНИТНЫЕ ПЛЕНКИ

Стремление значительно повысить скорость записи и считывания информации и уменьшить, таким образом, время обращения к запоминающему устройству привело к разработке запоминающих элементов на тонких ферромагнитных пленках.

Изготовление тонких пленок практически осуществляется в настоящее время одним из следующих трех способов: 1) методом испарения ферромагнитного сплава в вакууме; 2) методом катодного распыления в атмосфере газа; 3) гальваническим методом. Наибольшее распространение получил первый способ.

На рис. 21 изображена схема конструкции установки, предназначенной для изготовления этим способом пленочных запоминающих элементов. В вакуумной камере, в которой поддерживается разрежение порядка $(2 \div 3) 10^{-5}$ *мм рт. ст.*, помещается тигель из тугоплавкой керамики, заполненный подлежащим испарению ферромагнитным веществом. При экспериментальном изготовлении пленок применялась смесь, состоящая из 82% никеля и 18% железа.

Нагрев металлов осуществлялся индукционным способом токами высокой частоты. В верхней части камеры устанавливалась стеклянная подложка, на которой через металлическую маску происходило осаждение паров фер-

ромагнитного сплава, образуя запоминающие элементы в виде круглых пятен пленки толщиной от нескольких сотен до двух тысяч ангстрем и диаметром от 1,5 до 4 *мм*. Для придания пленочным элементам начальной магнитной ориентации в заданном направлении подложка помещается между полюсами электромагнита.

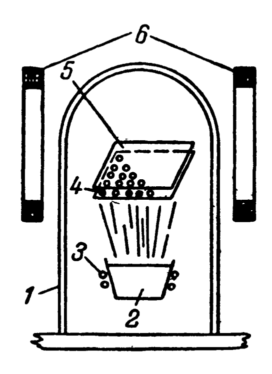


Рис 21. Схематическая конструкция установки для изготовления пленочных запоминающих элементов методом испарения в вакууме.

1—вакуумная камера; *2*—тигель из тугоплавкой керамики; *3*—обмотка для высокочастотного нагрева; *4*—металлическая маска; *5*—стеклянная подложка; *6*—катушка для создания ориентирующего магнитного поля.

Заслуживает внимания также способ изготовления магнитно ориентированных пленок из пермаллоя методом электролитического покрытия, причем пленки осаждаются на проводящий слой из золота, предварительно нанесенный на стеклянную подложку. Изготовленные таким образом пленки обладают теми же магнитными свойствами, что и пленки того же состава, изготовленные методом испарения в вакууме.

На рис. 22 показана форма петель гистерезиса железо-никелевой пленки, изготовленной описанным выше методом осаждения паров в вакууме. Эти кривые снимались при различных углах между направлением приложенного поля и направлением начального легкого намагничивания при образовании пленки в магнитном поле. При совпадении этих направлений, как видно из рис. 22,*а*, петля гистерезиса имеет форму, весьма близ-

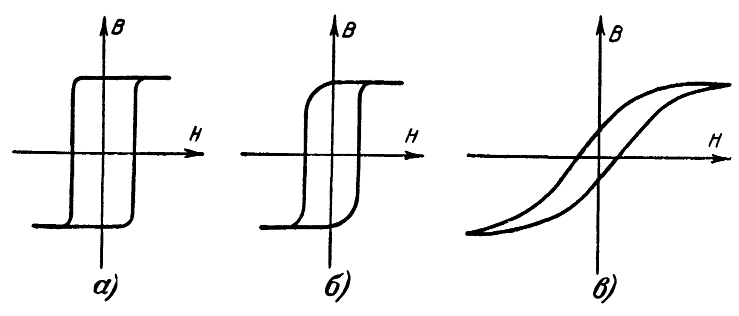


Рис. 22. Петли гистерезиса железо-никелевой пленки.

а—при воздействии поля, совпадающего по направлению с направлением легкого намагничивания; *б*—при угле 45° между этими направлениями; *в*—при угле 90° между этими направлениями.

кую к прямоугольной, причем хорошая прямоугольность ее сохраняется и в тех случаях, когда пленка является одним из звеньев разомкнутого магнитопровода. Это делает возможным применение запоминающих пленочных элементов без перфорации пленок и облегчает применение методов печатного монтажа при изготовлении этих элементов.

Исследования показали, что для пленок толщиной менее 300 Å время перемагничивания практически не зависит от их толщины. На рис. 23 приведена снятая экспериментальным путем кривая зависимости времени перемагничивания τ от напряженности приложенного поля *H* для пленки, изготовленной из сплава никеля, кобальта и железа. Как следует из кривой, при напряженности поля порядка 20 *э* пленка перемагничивается за время около 50 *нсек*. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что в лучших образцах пленок при оптимальном выборе их размеров это время может быть снижено до единиц наносекунд при напряженностях поля, не превышающих нескольких эрстед.

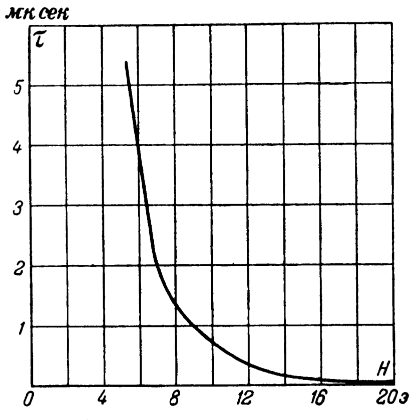


Рис. 23. Кривая зависимости времени перемагничивания от напряженности поля для пленки, изготовленной из сплава железа, никеля и кобальта.

На рис. 24 показана схема конструкции экспериментального запоминающего устройства на пленочных элементах. С 1959 г. подобное запоминающее устройство емкостью 32 десятиразрядных числа находится в опытной эксплуатации в машине ТХ-2 Массачузетского технологического института (США).

Каждый запоминающий элемент этого устройства представляет собой круглое пятно пленки пермаллоя толщиной 750 Å и диаметром 1,6 *мм*. Пятна в количестве 16 × 16 нанесены методом испарения в вакууме на плоскую стеклянную подложку толщиной 0,1 *мм*. Расстояние между центрами соседних пятен составляет 2,5 *мм*.

Ток, необходимый для записи информации в эти элементы, составляет 150 *ма*. Сигнал считывания информации

составляет около 1 *мв*. Время полного цикла обращения к запоминающему устройству, учитывая задержку сигналов в усилителях записи и считывания, составляет 0,8 *мксек*, что согласовывается со скоростью работы других блоков вычислительной машины. В процессе испытаний запоминающего устройства доказана возможность снижения времени цикла обращения до 0,4 *мксек*.

Наряду с высокой скоростью работы и экономичностью важным преимуществом пленочных элементов является также хороший естественный отвод выделяющегося в них тепла, обусловленный благоприятным отношением поверхности к объему ферромагнитного материала. Это в свою очередь создает условия для работы устройств с высокой частотой повторения циклов обращения к ним.

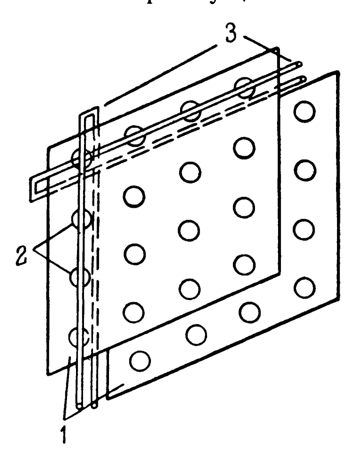


Рис. 24. Схема конструкции экспериментального пленочного запоминающего устройства.

1 — стеклянные подложки; *2* — кружочки пермаллоевой пленки; *3* — провода записи и считывания.

Наряду с описанными плоскими конструкциями пленочных запоминающих элементов создан ряд опытных конструкций цилиндрических запоминающих устройств на стеклянных стержнях, покрытых магнитной пленкой. В одном из вариантов таких устройств основной конструкции являются стеклянные стержни толщиной 0,25 *мм*, на которые вначале наносится слой серебра, а затем сплав железа с никелем. Каждый запоминающий элемент содержит участок стержня с пленкой, охваченной четырьмя обмотками: двумя входными, одной выходной и одной разрешающей. На 1 *см* длины стержня может размещаться до четырех запоминающих элементов. Размеры запоминающего блока емкостью 768 двоичных цифр составляют 56×56×56 *мм*.

Уже достигнутые в настоящее время результаты в области экспериментальных разработок запоминающих устройств на пленочных элементах позволяют предсказать, что они сыграют весьма важную роль в создании сверхбыстродействующих экономичных и малогабаритных вычислительных машин.

12. ТВИСТОРЫ

Одним из возможных вариантов ферромагнитных запоминающих устройств являются устройства, в которых хранение информации осуществляется на магнитной проволоке. В первой конструкции устройств такого типа, разработанной в 1957 г., применялась предварительно скрученная проволока из ферромагнитного материала, вследствие чего описываемые запоминающие элементы и получили название твисторов (от английского twist — скручивать).

Устройство таких твисторов основано на том, что в ферромагнитном материале, подверженном механическим напряжениям, возникает неодинаковость его магнитных

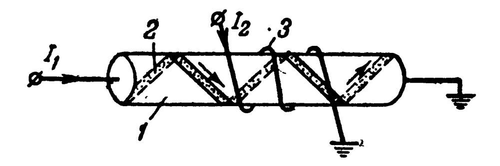


Рис. 25. Твистор с одной обмоткой на предварительно скрученной магнитной проволоке.

1 — проволока из магнитного материала; *2* — направление легкого намагничивания; *3* — обмотка.

свойств по различным направлениям, выражающаяся, в частности, в появлении направлений легкого намагничивания, совпадающих с направлениями наибольшего сжатия или растяжения материала (в зависимости от знака коэффициента магнитострикции).

Таким образом, в предварительно скрученной магнитной проволоке направление легкого намагничивания имеет вид спирали (геликоида), ось которой совмещена с осью проволоки.

На рис. 25 изображена схема устройства простейшего однообмоточного твистора на такой проволоке. При пропускании через проволоку тока I_1 создается поле, перпендикулярное оси провода, а при пропускании через обмотку тока I_2 — поле, направленное вдоль этой оси. В результате одновременного действия токов I_1 и I_2 соответственных величин и знаков можно создать магнитное поле, направление которого совпадает с направлением легкого намагничивания, и, таким образом, записать информацию в запоминающем элементе, избранном по методу совпадения двух токов.

Для считывания информации через обмотку пропускается ток I_2 противоположного направления и достаточной величины. При этом на концах магнитной проволоки, которая выполняет и роль обмотки считывания, возникает э. д. с., обусловленная поворотом вектора намагниченности данного элемента и являющаяся сигналом считывания. Величина этой э. д. с. при считывании предварительно намагниченных участков (запись «1») оказывается значительно больше, чем при считывании ненамагниченных участков (запись «0»).

Предложен также ряд других конструктивных вариантов твисторов как на предварительно скрученной, так и на нескрученной магнитной проволоке. В последнем случае спиральное намагничивание обеспечивается одновременным пропусканием тока через обмотку и магнитный провод. При этом ток в обмотке всегда имеет одно и то же направление, а ток в проволоке — одно направление при записи нуля и другое при записи единицы. Благодаря этому намагничивание проволоки происходит либо по правовинтовой, либо по левовинтовой спирали.

При считывании информации ток достаточной величины пропускается только через обмотку в направлении, противоположном току при записи. В результате спиральное намагничивание соответствующих участков проволоки заменяется аксиальным, и в проволоке индуктируется э. д. с. того или иного знака в зависимости от ранее записанной на данном участке информации. При этом происходит стирание информации, а если она должна быть сохранена, то необходимо применять схемы, обеспечивающие ее восстановление.

Наиболее перспективными с точки зрения создания запоминающих устройств большой емкости являются твисторы из немагнитной аксиальной медной проволоки, на которую спирально нанесен магнитный слой. Технологически магнитный слой наносится либо путем машинной намотки на медный проводник магнитной ленты, либо электролитическим путем. В одном из описанных в литературе вариантов твисторов с машинной намоткой в качестве аксиального проводника применялась медная изолированная проволока диаметром около 0,08 *мм*, на которую спирально намотана лента из пермаллоя шириной 0,1 и толщиной 0,006 *мм*.

На таких твисторах было разработано экспериментальное запоминающее устройство, схематическая конструкция

небольшого участка которого приведена на рис. 26. Твисторные проводники (в количестве, равном количеству разрядов в запоминаемых числах) укладываются и охватываются U-образными медными полосками, связанными с внешней схемой через магнитный тороидальный сердечник. Каждая такая полоска с заключенными между ее сторонами участками твисторного проводника представляет собой один числовой регистр. Поскольку медная полоса имеет такую ширину, что между ее сторонами укладывается до десяти витков спиральной пермаллоевой ленты, то при считывании сигнала сказывается как бы явление трансформации, заключающееся в том, что составляющая магнитного потока, создающая э. д. с. в центральном медном проводнике, возникает в результате суммирования изменения магнитных потоков всех десяти витков пермаллоевой спирали. Это уникальное свойство твисторов позволяет получить сигналы считывания информации из запоминающего устройства порядка нескольких милливольт.

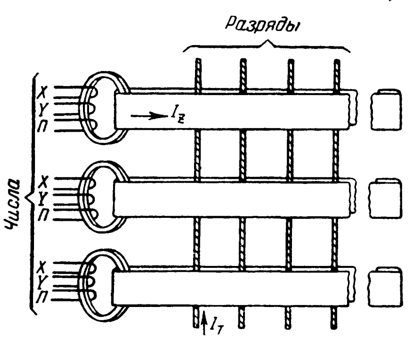


Рис. 26. Схематическая конструкция запоминающего устройства на твисторах.

Запись информации в описываемом устройстве осуществляется по принципу совпадения токов I_z в избранной медной полоске и $I_т$ в аксиальном проводе твистора. Выбор необходимой полоски достигается возбуждением соответствующего тороидального сердечника также по принципу совпадения токов в охватывающих его обмотках *X* и *Y*. Обмотка *П* служит для создания постоянного подмагничивающего поля. что позволяет перемагничивать сердечники в форсированном режиме (большими токами). Полный цикл обращения к описанному экспериментальному устройству составляет около 6 *мксек.*

При нанесении магнитного слоя электролитическим путем проволока из проводящего материала подвергается предварительному растяжению и химической очистке поверхности. Затем в электролитической ванне она покрывается магнитным материалом (например, сплавом из 22% железа и 78% никеля) толщиной порядка 3—5 *мк*, причем

при определенных условиях процесса электроосаждения удается обеспечить получение имеющего форму спирали направления легкого намагничивания. Изготовленная описанным способом разрядная или запоминающая проволока перемагничивается за время порядка нескольких десятков микросекунд и сохраняет нормальные рабочие параметры в пределах изменения температуры от —100 до +100° С.

Применение твисторов может оказаться целесообразным для создания экономичных и малогабаритных запоминающих устройств весьма большой емкости. По имеющимся в литературе сведениям одна из американских фирм выпустила в 1960 г. электронную вычислительную машину, в которой блок постоянного запоминающего устройства емкостью до 10 000 чисел построен на твисторах.

13. ЭЛЕМЕНТЫ ТИПА «БИАКС»

Одним из наиболее новых ферромагнитных элементов для вычислительных машин является разработанный в американской лаборатории фирмы «Форд Мотор» элемент биакс, предназначенный для запоминающих устройств и логических цепей.

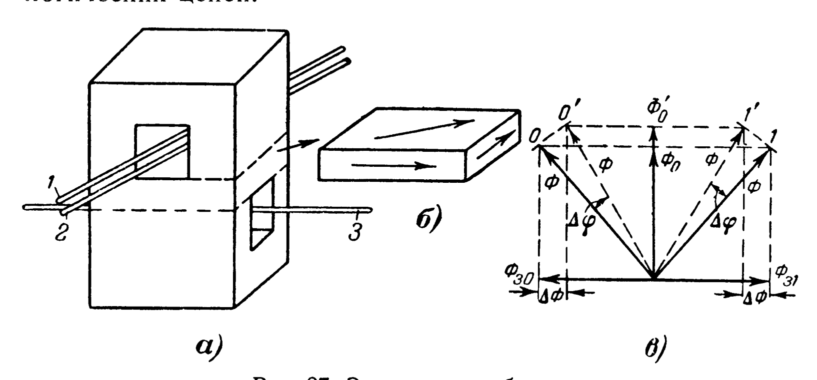


Рис. 27. Элемент типа биакс.

а — устройство элемента; б — ориентация магнитного потока в перемычке между отверстиями; *в* — векторные диаграммы потоков при записи и считывании.

Биакс, как запоминающий элемент (рис. 27,*а*), представляет собой ферритовый параллелепипед с двумя отверстиями квадратной формы, оси которых взаимно-перпендикулярны (отсюда и название «биакс» — биаксиальный, двухосевой). Размеры биакса в его первоначальной конструкции 1,25×1,25×2,1 *мм*, размеры отверстий 0,5×0,5 *мм*,

толщина внешних стенок и перемычки между отверстиями составляет 0,375 *мм*.

Одно из отверстий, например верхнее, используется для запоминания информации. Через это отверстие продеваются проводники записи *1* и считывания *2*. Другое, нижнее отверстие предназначено для провода *3*, в который при считывании подаются так называемые опросные (зондирующие, считывающие) импульсы.

В основе работы биакса лежит взаимодействие ортогональных магнитных потоков, создаваемых в перемычке между отверстиями. Если ферритовые зоны вокруг верхнего и нижнего отверстий намагничены токами до насыщения, то во внутренней стенке (перемычке между отверстиями) поток насыщения Ф будет направлен по диагонали, как это показано на рис. 27,*б*. Составляющие этого потока, связанные с верхним и нижним отверстиями, будут, очевидно, меньше потока насыщения и по абсолютной величине равны $Ф/\sqrt{2}$.

Предположим, как это показано на рис. 27,*в*, что в случае записи «1» вектор потока верхнего отверстия $Ф_{з1}$ ориентирован направо, а в случае записи «0» вектор этого потока $Ф_{з0}$ ориентирован налево. При неизменной ориентации вектора потока нижнего отверстия $Ф_0$ результирующий поток Ф будет занимать положение *1* при записи «1» и положение *0* при записи «0».

При пропускании по проводу *3* опросных импульсов, создающих поток того же направления, что и $Ф_0$, поток нижнего отверстия будет возрастать до величины $Ф_0'$. Так как поток Ф представляет собой поток насыщения, он не возрастает, а лишь поворачивается на угол $\Delta\varphi$ в направлении $Ф_0$, что приводит к уменьшению величины потока верхнего отверстия на величину $\Delta Ф$ и к возникновению в проводе считывания э. д. с., пропорциональной $\Delta Ф/\Delta t$. Величина этой э. д. с. одинакова при считывании «1» и «0», но, так как знак приращения $\Delta Ф$ различен и зависит от того, записана была в биаксе информация «0» или «1», то этим соответственно определяется и знак э. д. с., индуктированной в проводе считывания.

После окончания опросного импульса восстанавливается первоначальное распределение потоков в перемычке между отверстиями, т. е. обеспечивается считывание информации без ее разрушения и, таким образом, отпадает необходимость в ее восстановлении, а значит, и ускоряется работа запоминающего устройства.

Считывание информации из биакса осуществляется за время около 0,2 *мксек*, причем, как показали эксперименты, такой элемент может быть опрошен сотни миллиардов раз с частотой около 10 *Мгц* без заметного изменения сигнала считывания и нагрева элемента.

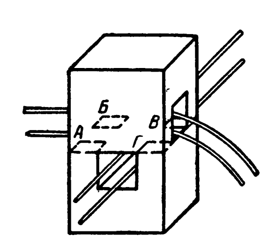


Рис. 28. Логический элемент биакс.

Биакс, изготовленный из феррита с точкой Кюри 180° С, работает нормально при температуре окружающей среды до 125° С.

Биаксы можно использовать и в качестве схемных логических элементов. Такие элементы (рис. 28) отличаются от запоминающих отсутствием стенки между взаимно-перпендикулярными отверстиями. В процессе работы логического биакса под воздействием токов, протекающих через провода, проходящие сквозь его отверстия, изменяются величины и знаки магнитных потоков в общих для обоих отверстий участках *А*, *Б*, *В* и *Г*.

Основными достоинствами биаксов являются малые размеры, высокая скорость записи и, особенно, считывания информации, большая надежность, возможность использования материалов с невысокой прямоугольностью петли гистерезиса и дешевизна.

Глава четвертая

ЭЛЕМЕНТЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ЯВЛЕНИИ СВЕРХПРОВОДИМОСТИ

14. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О СВОЙСТВАХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ГЛУБОКОМ ОХЛАЖДЕНИИ

В течение последних 5 лет разработан ряд элементов, основанных на использовании явления сверхпроводимости при глубоком охлаждении, пригодных для применения в запоминающих устройствах и логических схемах вычислительных машин. Напомним основные сведения о поведении и свойствах некоторых металлов при температурах, близких к абсолютному нулю.

В настоящее время, кроме многочисленных сплавов и соединений, известно около 20 элементов, у которых при температурах, близких к абсолютному нулю, электрическое

сопротивление скачком обращается в нуль. Эти температуры, различные для каждого элемента, при которых он переходит в состояние сверхпроводимости, носят название критических температур. Для чистых элементов критические температуры изменяются от 0,35° K для гафния до 11,7° K для технеция.

Однако при воздействии на металл внешнего магнитного поля критическая температура, при которой он становится сверхпроводником, понижается, причем тем сильнее, чем больше напряженность воздействующего поля.

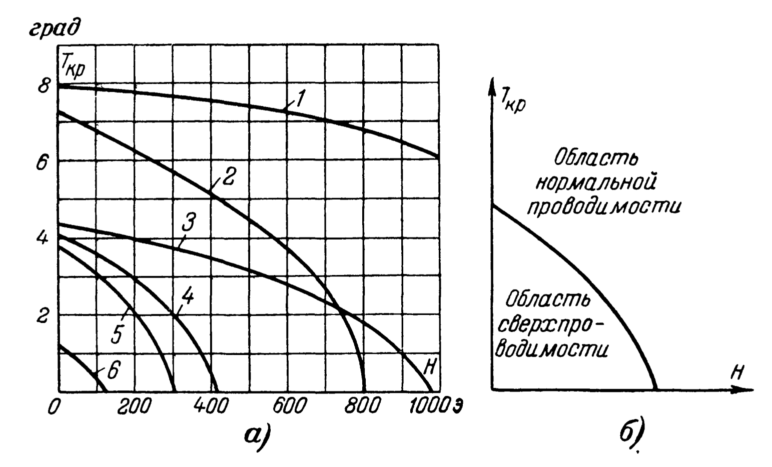


Рис. 29. Зависимость критической температуры от напряженности магнитного поля для некоторых металлов (*а*) и распределение областей сверхпроводимости и нормальной проводимости (*б*).

1 — ниобий; *2* — свинец; *3* — тантал; *4* — ртуть; *5* — олово; *6* — алюминий.

На рис. 29,*а* приведены кривые зависимости критической температуры $T_{кр}$ от напряженности поля H для некоторых металлов. Как показано на рис. 29,*б*, для каждого из обладающих сверхпроводящими свойствами металлов все точки плоскости, ограниченной осями ординат и кривой $T_{кр}=f(H)$, принадлежат к области сверхпроводимости, а все точки плоскости справа от этой кривой относятся к области нормального удельного сопротивления проводника.

Следует отметить, что все сверхпроводники являются диамагнетиками особого рода с магнитной проницаемостью $\mu=0$, благодаря чему плотность магнитного потока внутри сверхпроводника равна нулю.

15. КРИОТРОНЫ

Описанные выше явления сверхпроводимости и зависимость критической температуры от величины магнитного поля положены в основу действия прибора, получившего название криотрона (от греческого слова «криос» — холод).

Криотрон (рис. 30,*а*) представляет собой танталовый стержень длиной около 25 и диаметром около 0,25 *мм*. На этот стержень нанесена однослойная обмотка управления, состоящая из 250 витков изолированной ниобиевой проволоки диаметром около 0,08 *мм*. Схемы с криотронами помещают в криостат, в котором при помощи жидкого гелия

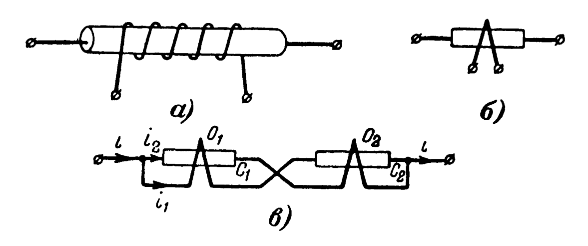


Рис. 30. Криотрон.

а — устройство; *б* — условное схематическое обозначение; *в* — бистабильный криотронный элемент — триггер.

поддерживается температура 4,2° К, причем как тантал, так и ниобий находятся в сверхпроводящем состоянии.

Если затем, пропуская через обмотку ток, создать магнитное поле напряженностью около 40 *э*, то танталовый стержень при температуре 4,2° К перейдет из сверхпроводящего состояния в состояние нормальной проводимости, тогда как ниобиевая обмотка останется в состоянии сверхпроводимости. Таким образом, действие криотрона можно сравнить с работой тиратрона, причем управляющая обмотка играет роль сетки, а танталовый стержень подобен промежутку анод — катод тиратрона. Однако в тиратроне сетка управляет лишь моментом его зажигания, а затем теряет свое управляющее действие, тогда как в криотроне прекращение тока через обмотку восстанавливает сверхпроводящее состояние стержня.

На рис. 30,*б* показано условное обозначение описанного криотрона в схемах, а на рис. 30,*в* — схема бистабильного элемента на двух криотронах, т. е. криотронного триггера.

Ток i, питающий триггер, может разветвляться по двум параллельным цепям. Одна из них включает в себя обмотку O_1 первого и стержень C_2 второго криотрона, другая — стержень C_1 первого и обмотку O_2 второго криотрона. Казалось бы, что токи в обеих ветвях, обладающих нулевым сопротивлением, достигнут одинаково большой величины, определяющейся э. д. с. источника питания и его внутренним сопротивлением. Однако как только ток i_1 в одной из ветвей, например O_1C_2, достигнет критического значения, при котором магнитное поле обмотки O_1 разрушит сверхпроводящее состояние стержня C_1, сопротивление ветви C_1O_2 станет конечным. Это ограничит величину

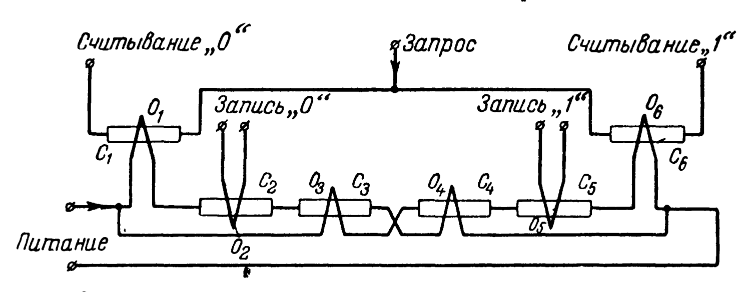


Рис. 31. Схема управляемого запоминающего элемента на шести криотронах.

тока i_2 в цепи C_1O_2 и, следовательно, сверхпроводящее состояние стержня C_2 разрушено не будет, сопротивление цепи O_1C_2 будет оставаться равным нулю и по ней будет продолжать протекать большой ток i_1. Таким образом, триггер будет неограниченно долго сохранять устойчивое состояние до тех пор, пока некоторым внешним управляющим воздействием он не будет переброшен в другое устойчивое состояние.

Для управления криотронным запоминающим элементом может быть применена схема, изображенная на рис. 31. Ток, подаваемый на зажимы питания, может замыкаться по одной из двух параллельных сверхпроводящих ветвей: первой $O_1C_2C_3O_4$ или второй $O_3C_4C_5O_6$. Если подать импульс тока на зажимы записи «0», то разрушается сверхпроводимость стержня C_2, ток в первой ветви становится малым и, следовательно, стержни C_1 и C_4 сохраняют свое сверхпроводящее состояние. Благодаря тому, что сопротивление C_4 равно нулю, во второй цепи поддерживается большой ток, протекающий через обмотки O_3

и O_6, что разрушает сверхпроводимость стержней C_3 и C_6. Нормальное сопротивление C_3 в свою очередь ограничивает ток в первой ветви и сохраняет состояние схемы, возникшее после записи «0». В этом случае стержень C_1 находится в сверхпроводящем состоянии, а C_6— в состоянии нормальной проводимости, и запрашивающий импульс (запрос) пройдет на выход считывания «0».

Аналогично при подаче импульса записи «1» схема переходит в другое устойчивое состояние, при котором устанавливается большой ток в цепи $O_1C_2C_3O_4$ и малый ток в цепи $O_3C_4C_5O_6$. При этом запрашивающий импульс попадает на выход считывания «1».

Криотроны описанной конструкции просты и дешевы, имеют небольшие размеры и потребляют ничтожную мощность, надежны в работе и характеризуются весьма незначительным уровнем собственных шумов. Основными недостатками их является необходимость глубокого охлаждения, довольно большое время срабатывания (порядка десятков микросекунд) и малая управляемая мощность (порядка долей милливатта).

Быстродействие криотронов значительно повышено в новой конструкции, в которой сердечник криотрона образуется напыленной на стекло полоской тантала толщиной 0,1 и шириной 1,25 *мм*, а управляющая обмотка представляет собой полоску ниобия, напыленную на тонкий изоляционный слой, отделяющий ее от танталовой полоски. При этом скорость переключения криотрона удалось довести до скорости переключения ферритовых сердечников, а технологию изготовления значительно упростить.

Очевидно, применение криотронных запоминающих и логических элементов в вычислительной технике может быть оправдано лишь при очень большом числе этих элементов, когда результирующая экономия энергии питания элементов значительно превышает расход энергии на работу криогенной установки, необходимой для глубокого охлаждения.

16. ЭЛЕМЕНТЫ С КРУГОВЫМИ ТОКАМИ В СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ СРЕДЕ

В настоящее время в лабораториях ведутся интенсивные работы, которые привели к созданию ряда новых более совершенных элементов, основанных на явлении сверхпроводимости.

Для создания запоминающих элементов можно использовать явление сверхпроводимости, не применяя магнитного поля для управления состоянием элемента.

Как известно, ток, введенный в сверхпроводящее замкнутое кольцо, может циркулировать в нем в течение длительного времени практически без затухания. Это позволяет создавать бистабильные запоминающие элементы в виде замкнутых кольцевых цепей, причем одно состояние такого элемента характеризуется циркуляцией тока в опре-

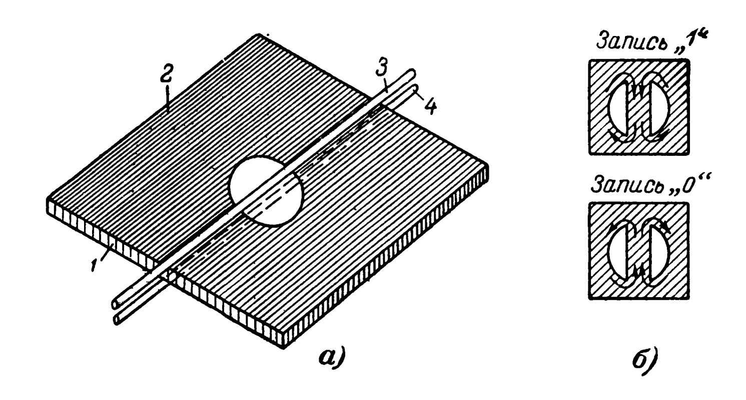


Рис. 32. Элемент с круговыми токами.

а — схематическая конструкция (*1* — пластинка из непроводящего материала; *2* — слой сверхпроводника; *3* — провод записи; *4* — провод считывания); *б* — распределение токов.

деленном направлении, а другое состояние — либо отсутствием тока, либо циркуляцией его в противоположном направлении.

Наиболее удачная конструкция элемента, основанного на этом принципе, разработанная в лаборатории фирмы ИБМ (США), представлена на рис. 32,*а*. Пластинка из стекла, слюды или другого изоляционного материала покрывается методом осаждения паров через маску тонким слоем олова или свинца. Это покрытие имеет форму «пряжки», т. е. содержит круглый участок, свободный от покрытия, с диаметральной металлической перемычкой (рис. 32,*б*).

Параллельно перемычке по обеим ее сторонам расположены изолированные проводники записи и считывания из материала с обычной проводимостью. Они связаны индуктивно через перемычку со сверхпроводящим контуром, об-

разованным D-образными отверстиями. Эти проводники могут быть нанесены путем осаждения металла или методом печатного монтажа.

При пропускании тока по проводу записи (управляющему проводу) вокруг него создается магнитное поле, все силовые линии которого практически охватывают и расположенную на очень малом расстоянии от провода записи сверхпроводящую перемычку. Таким образом, элемент эквивалентен трансформатору, первичной обмоткой которого является провод записи, а вторичной — перемычка вместе со сверхпроводящими слоями D-образной формы по обе ее стороны. В зависимости от направления импульса тока записи токи в перемычке и других участках сверхпроводника имеют то или другое направление, как это показано на рис. 32,*б*.

Провод считывания представляет собой как бы третью обмотку трансформатора, в которой при изменении направления тока в перемычке возникают импульсы считывания. Так как нормально перемычка находится в состоянии сверхпроводимости, то она служит эффективным экраном между проводами записи и считывания, и поэтому э. д. с. в проводе считывания индуктируется только от реверсирования тока в перемычке и не возникает от запрашивающих импульсов, посылаемых по проводнику записи. Считывание информации из элемента сопровождается ее разрушением, и для дальнейшего сохранения информации нужно применять соответствующие схемы восстановления.

Время переключения описанного элемента составляет около 10 *нсек*, что приблизительно на два порядка быстрее, чем у ферритовых сердечников. Элементы могут работать с тактовой частотой до 10 *Мгц*. Величина управляющего тока 50—150 *ма*, выходной сигнал около 5 *мв*. Достоинством элемента по сравнению с ферритовыми сердечниками является почти полное отсутствие помех.

Ориентировочные подсчеты показывают, что запоминающее устройство, включающее до миллиона описываемых сверхпроводящих элементов, может быть размещено в объеме около 30 *дм*^{3} (без цепей управления и криогенной установки).

Основная трудность, возникающая при конструировании подобных установок, заключается в изготовлении вводов многих сотен селектирующих, управляющих и считывающих проводов в криостат, в котором размещены сверхпроводящие элементы.

17. ПЕРСИСТОР

Подобно описанному выше элементу с круговыми токами в сверхпроводящей среде работает и другой запоминающий элемент на сверхпроводниках — персистор, разработанный в лаборатории фирмы Рамо-Вулдридж (США).

Персистор состоит из двух соединенных между собой параллельно сверхпроводников (рис. 33). Один из сверхпроводников R имеет малую индуктивность и изготовлен из металла с низким значением критического магнитного поля, а другой L обладает значительно большей индуктивностью и сделан из металла с большим значением критического магнитного поля.

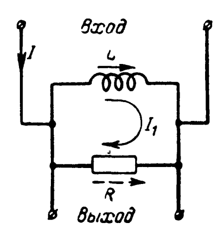


Рис. 33. Персистор.

Если к такому контуру подвести импульс тока записи, то в первый момент ток потечет в основном по ветви R, так как индуктивная ветвь в момент включения представляет для тока значительное сопротивление. Ток, протекающий по ветви R (пунктирная стрелка), создает магнитное поле, достаточное для разрушения сверхпроводимости этой ветви. При этом с сопротивления R и подключенных параллельно ему выходных зажимов снимается импульс напряжения. В следующий момент произойдет перераспределение токов и ток потечет в ветви L (сплошная стрелка).

По окончании импульса записи в ветви R восстанавливается сверхпроводимость, и запасенная в индуктивности L энергия создает в замкнутом контуре ток $I_1 < I$. Этот ток, будучи меньше критического, не разрушает сверхпроводимости ветви R и способен циркулировать в контуре персистора неограниченно долгое время. Направлением тока записи I и соответствующим направлением тока в контуре I_1 определяется зафиксированная персистором информации («0» или «1»).

Обратим внимание на то, что после записи той или иной информации ток в ветви R протекает всегда в направлении, противоположном направлению тока записи. Поэтому при повторении импульса записи того же направления, что и предшествующий импульс записи, в ветви R происходит вычитание токов записи и контурного тока, причем результирующий ток $I—I_1$ оказывается недостаточным для разрушения сверхпроводимости ветви R. Следовательно, импульс напряжения на выходных зажимах при этом не возникает.

При подаче на вход импульса противоположного направления входной и контурный токи в ветви R складываются, сверхпроводимость этой ветви разрушается, и на выходе появляется импульс напряжения.

На этих явлениях и основано считывание информации из персистора. Для считывания на его вход нужно подавать импульсы записи нуля. При этом, если в персисторе была записана единица, то происходит стирание ее и на вход выдается импульс считывания. Если же был записан нуль, то состояние персистора не изменяется и импульс напряжения на выходе не возникает.

В одной из описанных в литературе конструкций персистора ветвь R выполнена из олова в виде напыленной пленки толщиной 0,4 *мк*, шириной 0,25 *мм* и длиной 6 *мм*. При разрушенной магнитным полем сверхпроводимости сопротивление этой ветви при температуре 4° К составляет 0,36 *ом*. Индуктивная ветвь изготовлена из свинца, напыленного в виде двух витков диаметром 10 *мм*. Ее индуктивность составляет 0,05 *мкгн*. Время срабатывания описанного персистора составляет 20—100 *нсек*. При токе в 300 *ма* напряжение импульса считывания достигает 0,1 *в*.

Время переключения персистора существенно зависит от толщины пленки и может быть уменьшено до единиц наносекунд. Если для переключения используются импульсы фиксированной длительности, то величина отношения L/R персистора должна быть подобрана так, чтобы сумма времени переключения и величина L/R была равна длительности импульса, а время переключения было меньше величины $L/2R$.

Для управления персистором можно применить две катушки, индуктивно связанные с индуктивностью персистора L. При этом амплитуда импульсов тока в управляющих катушках берется такой величины, чтобы в персисторе возникал достаточный для его переключения ток лишь при совпадении во времени импульсов в обеих катушках.

Таким образом, на персисторах может быть построено запоминающее устройство матричного типа, работающее по принципу совпадения токов подобно матричным устройствам на ферритовых сердечниках. Сигналы считывания информации из такого запоминающего устройства снимаются с выхода цепи, соединяющей выходные зажимы отдельных персисторов, подключенные, как видно из рис. 33, к концам резистивных ветвей R.

Объем, занимаемый персисторами, относительно неве-

лик. На 1 *см*^{2} пластины-подложки удается наносить методом печатного монтажа до десятка персисторов, что обеспечивает объемную плотность упаковки до 35 персисторов на 1 *см*^{3}. При этом для устранения взаимного влияния между пластинами делаются прокладки из свинцовой фольги, которая в сверхпроводящем состоянии обеспечивает идеальное экранирование.

18. КРИОЗАР

Действие бистабильного полупроводникового элемента, получившего название криозара, основано на явлениях, которые происходят в полупроводниках при температурах, близких к абсолютному нулю. В качестве материала для изготовления криозара применяется германий с примесью трехвалентных и пятивалентных элементов. Удельное сопротивление такого германия при температуре жидкого гелия составляет около 10^9 *ом·см*. При воздействии электрического поля напряженностью около 5 *в/см* в полупроводнике происходит обратимый неразрушающий прибой в результате так называемой ударной ионизации примесей. При этом сопротивление германия уменьшается приблизительно в 10^8 раз.

Описанный процесс характеризуется вольт-амперной характеристикой криозара, изображенной на рис. 34. Эта характеристика похожа на вольт-амперную характеристику газоразрядного прибора. Однако важной особенностью процессов в полупроводнике по сравнению с лавинным пробоем в газе является весьма короткое время восстановления высокого сопротивления после того, как приложенное напряжение снизится до величины меньше критической. Это время не превышает 10 *нсек*.

Экспериментальные образцы криозаров представляли собой германиевые (с примесью индия) пластинки толщиной 0,05 *см*, на обеих сторонах которых гальваническим путем или испарением в вакууме были нанесены параллельные проводящие полоски. Эти полосы образуют контакт с пластинкой германия; направления полосок на противоположных сторонах пластинки взаимно-перпендикулярны. Таким образом, в местах пересечения полосок создаются запоминающие элементы в виде небольших объемов германия, заключенного между полосками.

Площадь матриц объемом 5×5 элементов составляла 1 *см*^{2} при толщине 0,05 *см*. Предполагается, что на 1 *см*^{2} можно разместить до 20×20 элементов при одновремен-

ном снижении толщины пластины до 0,012 *см*. Это позволит довести объемную плотность упаковки (с учетом изолирующих прокладок между пластинами) до 20 000 элементов в 1 *см*^{3}.

В качестве одного из способов управления состоянием криозаров предложено применить нанесенные на каждый элемент и включенные последовательно с ним германиевые фотосопротивления. В зависимости от освещенности такого сопротивления изменяется падение напряжения на нем и соответственно напряжение, приложенное к криозару, чем и определяется возникновение или отсутствие в последнем ударной ионизации. Однако при изменении освещенности переходный процесс в криозаре длится в течение времени порядка нескольких миллисекунд, тогда как при переключении напряжением время переходного процесса не превышает единиц микросекунд, а при увеличении избытка приложенного напряжения над критическим время переключения снижается до десятков наносекунд.

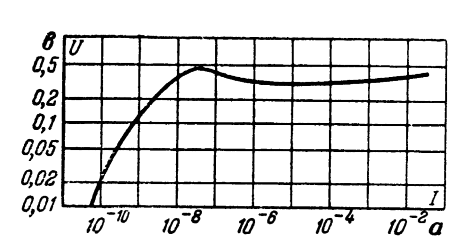


Рис. 34. Вольт-амперная характеристика криозара.

Кроме описанного типа криозара, разработаны еще так называемые двухпробойные криозары. Они изготовляются из соединенных вместе двух германиевых пластинок с различными вольт-амперными характеристиками. Образующийся таким образом элемент имеет две области лавинного пробоя и может быть использован в запоминающих устройствах, элементы которых срабатывают при совпадении импульсов напряжения. В литературе описано запоминающее устройство на криозарах, построенное на схеме с непосредственным выбором чисел (типа Z). В этом устройстве все число считывается одновременно без разрушения записанной информации при посылке в адресную шину запросного положительного импульса. Стирание информации осуществляется посылкой в адресную шину отрицательного импульса, а запись — по методу совпадения положительных импульсов в адресной шине и в разрядных проводах.

В заключение нужно подчеркнуть, что применение в вычислительной технике разнообразных элементов, основан-

ных на явлениях в металлах и полупроводниках при сверхнизких температурах, в настоящее время ограничивается пока экспериментальными разработками и лабораторными макетами. Это связано как с новизной самих криогенных элементов, так и с трудностями непрерывного поддержания глубокого охлаждения крупных узлов вычислительных машин, таких, например, как запоминающие устройства емкостью в десятки и сотни тысяч чисел.

Здесь имеет место, во-первых, выделение тепла при переключении элементов, особенно заметное при большой тактовой частоте работы машины и, во-вторых, проникновение тепла в блоки машины по большому количеству подводящих проводов.

При работе криогенных устройств на борту самолета, в ракете или космическом летательном аппарате сказываются трудности создания достаточно легких, компактных и надежных охлаждающих устройств. Правда, при полетах в космическом пространстве эта задача может быть значительно упрощена благодаря низкой температуре окружающей среды.

Важные достоинства криогенных элементов — их малые размеры и вес, ничтожный расход энергии и высокая надежность — открывают широкие перспективы их применения в вычислительной технике вообще и в управляющих кибернетических машинах в авиации и ракетной технике, в частности.

Глава пятая

ЭЛЕМЕНТЫ С ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

19. ПРИНЦИПЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Явление параметрического возбуждения колебаний было открыто около 100 лет назад, однако достаточно полное теоретическое и экспериментальное исследование этого явления было осуществлено лишь в 20-х—30-х годах в основном трудами советских физиков Л. И. Мандельштама, Н. Д. Папалекси и их учеников. В частности, в 1928 г. Мандельштам и Папалекси осуществили параметрическое возбуждение колебаний высокой частоты в контуре периодическим изменением индуктивности катушки с сердечником путем изменения намагничивания последнего. Параметрическое возбуждение колебаний имеет сходство с явлением резонанса, поэтому его часто называют параметрическим резонансом.

В 1954 г. в Японии сотрудник Токийского университета Е. Гото установил возможность использования явления возбуждения параметрических колебаний для запоминания информации и выполнения логических операций в цифровых вычислительных машинах. Разработанный Гото бистабильный элемент был назван параметроном.

В настоящее время параметроны получили широкое распространение в Японии и начали применяться за ее пределами. Около половины всех работающих в Японии цифровых машин содержат параметроны, используемые в качестве логических элементов. Проводятся работы по внедрению параметронов как переключающих элементов в технику телеграфной и телефонной связи и в цифровые системы управления станками.

Прежде чем рассматривать практическое устройство параметронов и схемы их применения, опишем кратко основные принципы параметрического возбуждения электромагнитных колебаний. Для того чтобы возбудить и поддержать колебания в любой колебательной системе, в частности, в колебательном контуре, нужно все время добавлять извне некоторое количество энергии, необходимое для возмещения потерь в системе (в активном сопротивлении контура или потерь на трение в механических системах).

В случае вынужденных колебаний, возбуждаемых в системе с неизменными параметрами, энергия в нее вводится так называемым прямым путем. Например, раскачивание качелей может быть осуществлено стоящим на земле человеком за счет энергии, сообщаемой им качелям во время толчков, совпадающих по частоте и направлению с собственными колебаниями качелей. Возбуждение колебаний в колебательном контуре осуществляется питанием этого контура от источника переменного тока резонансной частоты.

Однако сообщать энергию колебательной системе можно и косвенным путем, периодически изменяя один или несколько параметров самой системы. При выполнении определенных условий это также может привести к возникновению и поддержанию колебаний в системе.

В качестве примера такого параметрического возбуждения колебаний можно привести раскачивание качелей самим находящимся на них человеком. Для этого человек, стоящий на доске качелей, должен приседать в те моменты, когда качели находятся в крайних нижних положениях, и резко распрямляться в момент прохождения качелей

через высшую точку. При этом изменяется расстояние между центром тяжести качелей и точкой их подвеса, т. е. изменяется длина маятника, каковым с физической точки зрения и являются качели.

Необходимо обратить внимание на то, что раскачать описанным способом неподвижные качели невозможно. Дело в том, что при приседании и распрямлении на неподвижных качелях работа, затрачиваемая человеком при подъеме центра тяжести, будет возвращаться при его опускании. Но если качели до этого уже хотя бы незначительно раскачивались, то при каждом цикле изменения такого параметра будет совершаться работа, что и приведет к увеличению амплитуды колебаний, т. е. к параметрическому возбуждению системы.

Для того чтобы успешно возбуждать параметрические колебания системы, необходимо воздействовать на ее «энергоемкие» параметры, т. е. на те параметры, которые служат наиболее емкими накопителями энергии в системе. В электромагнитном колебательном контуре такими параметрами являются емкость и индуктивность. Если периодически изменять любой из этих параметров, то при определенных условиях в контуре будут нарастать колебания электрического тока, т. е. начнется процесс параметрического возбуждения электромагнитных колебаний.

Рассмотрим этот процесс возбуждения колебаниий при периодическом изменении индуктивности контура. Пусть в контуре, который содержит некоторую индуктивность L_0, емкость C_0 и активное сопротивление R, в начальный момент t_0 протекает ток i (рис. 35). Увеличим в этот момент индуктивность контура на величину ΔL, вводя, например, в катушку стальной сердечник. Так как энергия магнитного поля катушки определяется выражением $Li^2/2$, то она возрастет в этот момент на величину

$$\frac{(L_0 + \Delta L)\, i^2}{2} - \frac{L_0 i^2}{2} = \frac{\Delta L i^2}{2}.$$

Если теперь предоставить контур самому себе, то ток в контуре начнет убывать, и энергия магнитного поля катушки станет переходить в энергию электрического поля конденсатора. Через четверть периода, в момент t_1, когда ток станет равным нулю, а напряжение на конденсаторе достигнет максимальной величины, выведем сердечник, уменьшив индуктивность катушки на ту же величину ΔL и восстановив ее начальное значение L_0.

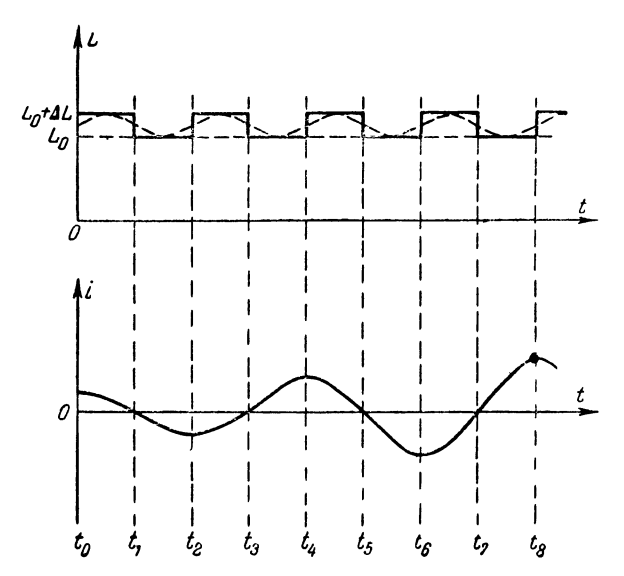


Рис. 35. Параметрическое возбуждение контура путем изменения его индуктивности.

Так как ток и магнитное поле катушки в этот момент равны нулю, то можно считать, что никакая работа при выдвигании сердечника затрачиваться не будет (механическим трением пренебрегаем). Еще через четверть периода в момент времени t_2, когда ток достигнет максимального противоположного значения, опять введем сердечник, увеличив индуктивность на ΔL и увеличив энергию в контуре на $\Delta L i^2/2$, а в момент t_3, когда $i=0$, снова выведем сердечник, не расходуя на это энергии контура, и т. д.

Таким образом, один раз за каждый полупериод колебательного процесса в момент, когда ток в катушке достигает максимальной величины, контуру сообщается некоторая дополнительная порция энергии, равная $\Delta L i^2/2$. Очевидно, что если эта энергия превышает потери в активном сопротивлении R контура за то же время, то амплитуда колебаний в контуре будет нарастать, как это и показано нижней кривой на рис. 35. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока возрастающие потери в контуре не станут равны вносимой в контур дополнительной энергии, после чего амплитуда колебаний стабилизируется.

Практически изменять индуктивность удобнее не скачками, как показано верхней кривой на рис. 35 (сплошная

линия), а плавно (штриховая линия). Частота колебаний индуктивности вокруг среднего значения $L_0+\Delta L/2$ должна быть при этом в 2 раза выше собственной резонансной частоты колебательного контура.

Хотя наиболее благоприятным для параметрического возбуждения соотношением частот изменения параметра и собственной резонансной частоты контура является 2 : 1, аналогичный подвод энергии контуру может быть достигнут и при некоторых других соотношениях частот.

Описанный процесс параметрического возбуждения в контуре может быть осуществлен и путем изменения емкости контурного конденсатора. Изменение параметров контура с достаточно большой частотой на практике осуществляется электрическими методами.

20. ПАРАМЕТРОНЫ

Схема параметрона с переменной индуктивностью и графики, иллюстрирующие процессы в нем, приведены на рис. 36. Колебательный контур параметрона состоит из емкости C и индуктивности L, равной сумме индуктивностей L' и L'' соединенных последовательно вторичных обмоток трансформаторов Tp_2 и Tp_3. Обмотки эти намотаны в противоположных направлениях, чем предотвращается непосредственный переход энергии в контур из первичной цепи. Контур питается от внешнего источника с частотой ω_0 через трансформатор Tp_1. Соединенные последовательно первичные обмотки l' и l'' трансформаторов Tp_2 и Tp_3 образуют цепь возбуждения, в которую включены источник постоянного смещения E и источник переменного тока Γ с частотой $2\omega_0$.

На рис. 36,*б* графически показан процесс изменения индуктивности контура $L=L'+L''$. Кривая *1* изображает зависимость индуктивности L от тока, протекающего по первичной цепи. Этот ток

$$i=I_0+I_1\sin 2\omega_0 t,$$

где I_0 — постоянный ток смещения, создаваемый источником смещения E, необходимый для выбора рабочей точки на кривой *1*;

I_1 — амплитуда переменного тока, создаваемого в первичной цепи генератором Γ.

Вследствие нелинейности функции $L=f(i)$ кривая *2* изменения индуктивности L во времени представляет собой искаженную синусоиду.

Процесс параметрического возбуждения в параметроне иллюстрируется графиками на рис. 36,*в*. Подводимые к контуру колебания с частотой ω_0 возбуждают в нем ток с некоторой амплитудой $I_к'$, который и протекает в контуре в течение времени от t_0 до t_1. В момент t_1 ключом K замыкается цепь возбуждения, причем индуктивность контура L начинает изменяться с частотой $2\omega_0$. Это приводит к пара-

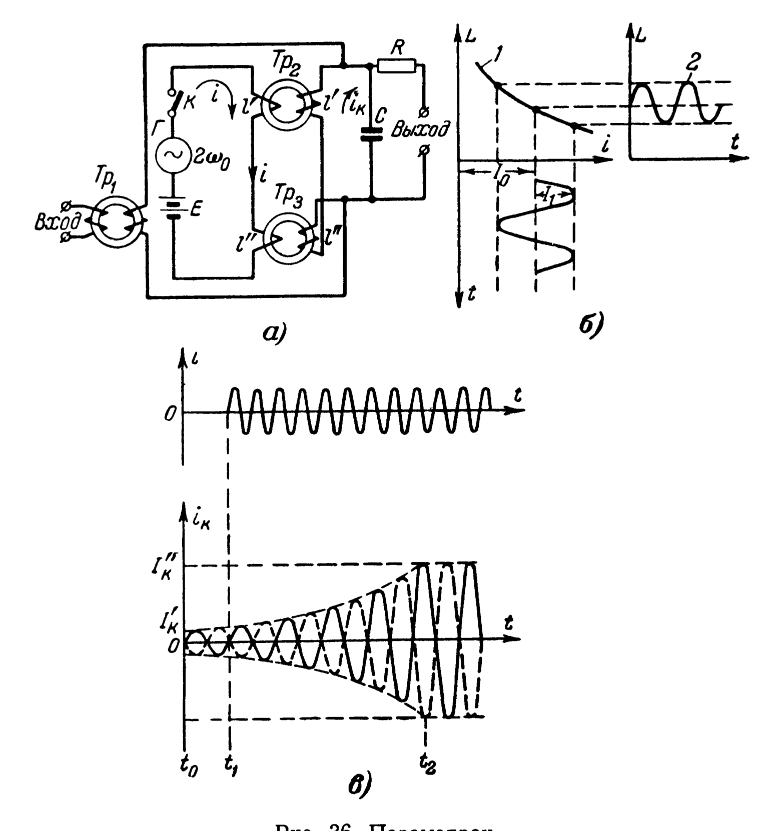


Рис. 36. Параметрон.

а — схема включения; *б* — график процесса изменения индуктивности в контуре параметрона; *в* — график процесса параметрического возбуждения.

метрическому возбуждению колебаний, причем амплитуда тока в контуре нарастает по экспоненциальному закону. Если бы рассматриваемые цепи были идеально линейны, то возрастание амплитуды продолжалось бы неограниченно долго. В действительности же вследствие нелинейности

зависимости $B=f(H)$ сердечников трансформаторов Tp_2 и Tp_3 колебательный контур расстраивается, и с возрастанием амплитуды колебаний увеличиваются потери на гистерезис. Поэтому в некоторый момент времени t_2 процесс устанавливается, амплитуда тока в контуре достигает максимальной величины $I_к''$ и дальнейшее нарастание колебаний прекращается. Таким образом, параметрон работает подобно усилителю с самоограничением амплитуды колебаний.

Процесс параметрического возбуждения в параметроне развивается и в том случае, если в момент t_1 подача на вход основного сигнала с частотой ω_0 прекращается. При размыкании ключа K, т. е. при прекращении питания цепи возбуждения параметрона, колебания в контуре прекращаются совершенно, если основной сигнал с частотой ω_0 на входе отсутствует. При наличии же сигнала на входе после прекращения возбуждения амплитуда колебаний в контуре уменьшается до своего первоначального значения $I_к'$.

Важно отметить, что возникшие в результате параметрического возбуждения установившиеся колебания в контуре параметрона могут иметь две возможные фазы, отличающиеся одна от другой на π *рад*. На рис. 36,*в* эти два возможных режима колебаний показаны сплошной и штриховой линиями. Выбор между этими двумя режимами установившихся колебаний полностью определяется фазой небольших начальных колебаний, подаваемых на вход параметрона. Поэтому для параметронов еще часто применяют более точное название — параметрический генератор с фазовой синхронизацией.

Существование двух возможных режимов установившихся колебаний в параметроне используется в вычислительной технике для представления информации «0» или «1». Это дает возможность применить параметроны в качестве двоичных запоминающих элементов. Для изменения зафиксированной в параметроне информации, т. е. для изменения фазы установившихся колебаний в его контуре, необходимо прекратить возбуждение параметрона, после чего достаточно подать на вход слабый управляющий сигнал противоположной фазы и вновь включить источник возбуждения.

Все сказанное относится и к параметронам, в которых в качестве переменного параметра используется емкость. Схема такого параметрона представлена на рис. 37. Здесь

емкость колебательного контура состоит из двух нелинейных конденсаторов C' и C''. Между средней точкой этих конденсаторов и средней точкой катушки с постоянной индуктивностью L можно приложить напряжение возбуждения с частотой $2\omega_0$, обусловливающее изменение с частотой $2\omega_0$ общей емкости $C = \frac{C' \cdot C''}{C' + C''}$.

Сопротивление R, включенное в выходную цепь параметронов, является сопротивлением связи между последо-

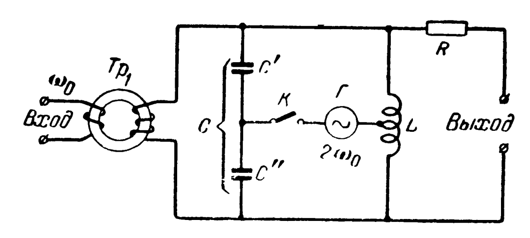


Рис. 37. Схема параметрона емкостного типа.

вательно включенными параметронами и служит для сглаживания толчков напряжения при изменении режимов работы параметронов.

21. ПАРАМЕТРОННЫЕ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ И ТРИГГЕРЫ

Рассмотрим схему линии задержки на параметронах, представленную на рис. 38. Она представляет собой цепочку последовательно соединенных параметронов, цепи возбуждения которых питаются сдвинутыми друг относительно друга сериями высокочастотных импульсов. Распределение этих импульсов во времени представлено на рис. 39. Серии импульсов с частотой $2\omega_0$ и длительностью τ поступают последовательно в параметроны $П_1$, $П_2$, $П_3$ и т. д., благодаря чему обеспечивается продвижение информации вдоль линии задержки.

Пусть в момент времени t_0 на вход линии задержки поступил сигнальный импульс с частотой ω_0, а на зажим *1* (см. рис. 38) — импульс возбуждения первой серии. Этот импульс поступает в цепи возбуждения параметронов $П_1$, $П_4$, $П_7$ и т. д. В параметроне $П_1$ произойдет параметрическое возбуждение, и напряжение, снятое с его контура через сопротивление связи R, поступит на вход параметро-

на $П_2$. В момент t_2 на вход 2 будет подан импульс возбуждения второй серии, которым питаются цепи возбуждения параметронов $П_2$, $П_5$, $П_8$,... Поэтому в момент t_2 начнется процесс возбуждения параметрона $П_2$. В момент t_3, когда закончится импульс возбуждения первой серии, прекращаются колебания в параметроне $П_1$. В момент t_4 на вход 3

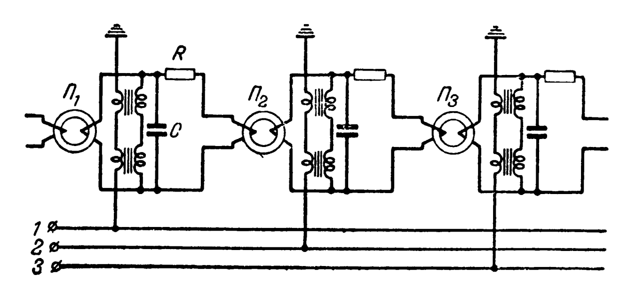


Рис. 38. Схема линии задержки на параметронах.

поступает импульс возбуждения третьей серии, питающей цепи возбуждения параметронов $П_3$, $П_6$, $П_9$,... При этом начинается параметрическое возбуждение контура $П_3$, а в момент t_5 прекратятся колебания в контуре $П_2$. В момент t_6 начнется возбуждение параметрона $П_4$, а в момент t_7 прекратятся колебания в контуре $П_3$ и т. д.

Таким образом, сигнальный импульс с частотой ω_0, поступивший на вход линии задержки, будет перемещаться

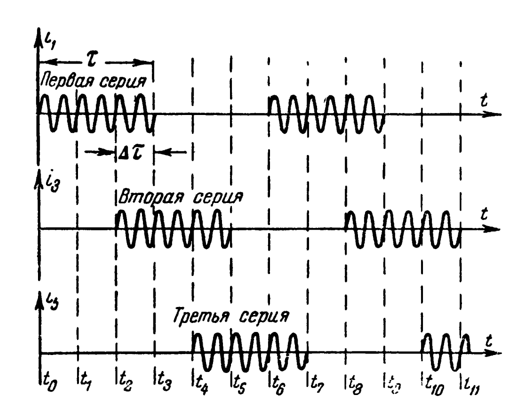


Рис. 39. Высокочастотные импульсы возбуждения параметронов в линии задержки.

вдоль линии слева направо, передаваясь от одного параметрона к другому. При этом три серии радиочастотных импульсов с частотой $2\omega_0$, сдвинутые друг относительно друга на 120°, играют роль «продвигающих» импульсов. Для того чтобы обеспечить описанный процесс «эстафетной» передачи сигнала от параметрона к параметрону, импульсы возбуждения последовательных серий должны следовать один за другим с некоторым перекрытием во времени $\Delta\tau$, как это и показано на рис. 39.

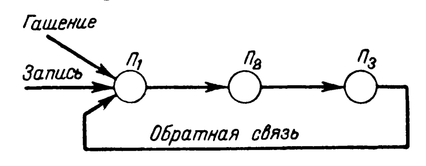


Рис. 40. Триггер на параметронах.

В качестве запоминающего элемента для хранения одной двоичной единицы информации может быть применен триггер на параметронах. Он представляет собой кольцевую схему (рис. 40), образованную тремя последовательно соединенными параметронами и цепью обратной связи. Такой триггер является, по сути дела, динамическим запоминающим устройством на трехэлементной параметронной линии задержки емкостью на один двоичный разряд.

Двумя устойчивыми состояниями триггера на параметронах являются два состояния циркулирующего процесса параметрического возбуждения, соответствующего двум взаимно противоположным фазам колебаний в контурах параметронов (сплошная или штриховая линия на рис. 36). Триггер устанавливается в положение «1» при подаче сигнала на вход «Запись» и в положение «0» при подаче того же сигнала на вход «Гашение». Для этого нужно только обмотку входа гашения на входном трансформаторе намотать в противоположном направлении, что и обеспечивает изменение фазы колебаний на 180°.

22. ПАРАМЕТРОНЫ КАК ЭЛЕМЕНТЫ ЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ

Соединяя между собой параметроны при помощи элементов связи (например, тороидальных трансформаторов) в различные группы, можно создавать разнообразные логические схемы, из которых затем можно строить сложные схемы цифровых вычислительных машин.

Как известно, имея в распоряжении набор из четырех элементарных логических схем, реализующих операции за-

держки, отрицания «НЕ», логического умножения «И» и логического сложения «ИЛИ», можно построить цифровую схему, реализующую любую сложную логическую зависимость.

Задержка сигнала на любой требуемый интервал времени может быть осуществлена при помощи линии задержки.

Весьма просто реализуется также и операция отрицания или инверсии сигнала, которая представляет собой замену в коде нулей единицами и единиц нулями. Так как

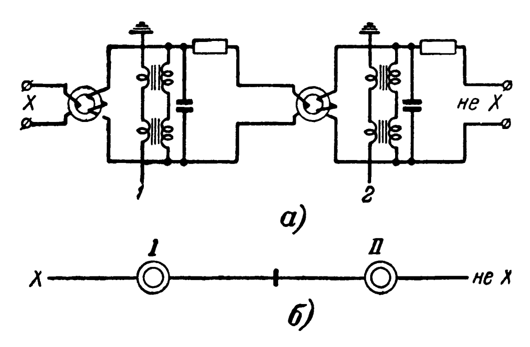


Рис. 41. Схема „НЕ“ на параметронах (*а*) и ее условное обозначение (*б*).

в параметронных схемах «0» и «1» отличаются лишь фазами колебаний, то операция «НЕ» практически может быть осуществлена последовательным соединением двух параметронов, входные обмотки которых включены разнополярно, как показано на рис. 41,*а*. В упрощенном условном изображении такое соединение с инверсией фазы показывают коротким штрихом на линии связи между параметронами (рис. 41,*б*).

Для осуществления операций «И» или «ИЛИ» могут быть применены двухкаскадные схемы на параметронах (рис. 42). В первом каскаде работают три параметрона (*А*, *Б* и *В*), с выходов которых колебания подаются на общий входной трансформатор параметрона *Г* второго каскада. Фаза колебаний в параметроне *Г* определяется фазой колебаний сигнала, являющегося результатом суммирования колебаний *а*, *б* и *в*, поступающих на его входной трансформатор от параметронов *А*, *Б* и *В*.

Эти колебания могут отличаться друг от друга по фазе на 180°. Очевидно, что одинаковые по амплитуде колеба-

ния с противоположными фазами будут взаимно компенсироваться, и фаза сигнала *г*, возникающего в результате сложения всех входных сигналов, будет определяться преобладанием числа входных сигналов с той или иной фазой, т. е. сигналов «0» или «1».

Этот принцип суммирования сигналов носит название мажоритарного принципа.

Схему с тремя входами, работающую по мажоритарному принципу, легко использовать для выполнения логи-

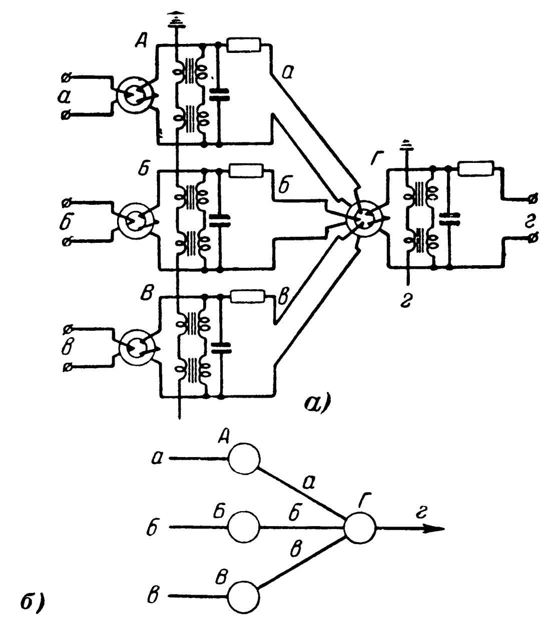


Рис. 42. Двухкаскадная схема на параметронах с тремя входами (*а*) и ее условное обозначение (*б*).

ческого умножения «И» и логического сложения «ИЛИ» двух входных двоичных переменных. Для этого нужно (рис. 43) подать сигналы, соответствующие значениям этих двоичных переменных («0» или «1»), на два основных входа схемы. Третий вход схемы является вспомогательным, и на него постоянно подается либо сигнал *в*=0 в схеме «И», либо сигнал *в*=1 в схеме «ИЛИ».

В первом случае (рис. 43,*а*) сигнал *г*=1 на выходе появится, очевидно, только при подаче на оба входа одно-

временно сигналов $a=1$ и $б=1$, т. е. эта схема представляет собой схему совпадения «И».

Во втором случае (рис. 43,*б*) сигнал $г=1$ на выходе появляется при подаче либо сигнала $a=1$, либо сигнала $б=1$, либо обоих сигналов $a=1$ и $б=1$ одновременно. Таким образом, эта схема является собирательной схемой «ИЛИ».

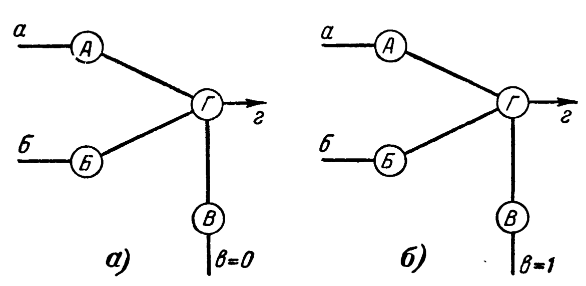


Рис. 43. Схемы на параметронах.
а — схема „И"; *б* — схема „ИЛИ".

Если собрать на параметронах мажоритарную схему с пятью входами и на два из них постоянно подать сигнал «0», то получим схему «И» на три сигнальных входа, а если на два входа постоянно подать сигнал «1», то получится схема «ИЛИ».

Схемы на параметронах позволяют подавать на входы сигналы от нескольких параметронов и снимать с выхода сигналы, которые в свою очередь поступают на большое число параметронов в последующих каскадах. Для современных параметронов максимально допустимое количество таких ветвей составляет 10—20. Это вполне соответствует требованиям, возникающим при конструировании универсальных и специализированных машин, предназначенных для обработки цифровой информации.

23. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОНОВ

Серийно выпускаемые японской промышленностью параметроны содержат в колебательном контуре вместо двух отдельных сердечников ферритовый полудиск с двумя небольшими отверстиями — так называемый сердечник бинокулярного типа (рис. 44). Входной трансформатор связи выполнен на ферритовом тороиде, причем его одновитко-

Таблица 1

Показатели	Виды параметронов		
	Маломощный	Стандартный	Быстродействующий
Частота возбуждения, *Мгц*	0,2	2	6
Максимальная частота синхронизации (тактовая частота), *кгц*	2	25	140
Мощность возбуждения на один параметрон (при непрерывном возбуждении), *мвт*	5	30	120
Постоянный ток смещения, *а*	0,6	0,6	0,6
Максимальное число входов	3 — 5	3 — 5	3 — 5
Максимальное число выходных ветвей	15	15	12

вая вторичная обмотка является последовательным элементом колебательного контура.

Характеристики серийных японских параметронов приведены в табл. 1.

Имеются опытные разработки параметронов с керамическими нелинейными конденсаторами на титанате бария.

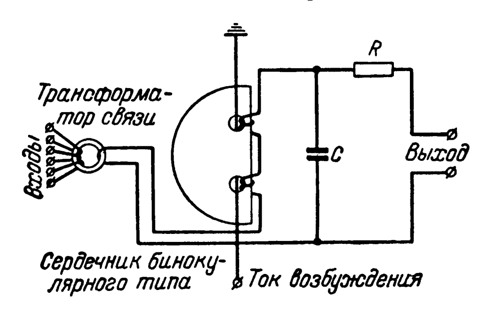


Рис. 44. Схема параметрона с сердечником бинокулярного типа.

Проводились также исследования параметронов, в которых в качестве переменной емкости использовалась барьерная емкость германиевых и селеновых диодов. В этих параметронах удалось получить частоту параметрических колебаний до 60 *Мгц*.

Так как параметроны содержат лишь конденсаторы, сопротивления или трансформаторы с ферромагнитными сердечниками, т. е. высокостабильные и прочные элементы, срок службы параметронов можно практически принимать весьма большим.

Как показывает опыт эксплуатации японских вычислительных машин, содержащих до 10 000 параметронов, неисправности последних встречаются чрезвычайно редко, а сами машины характеризуются весьма высокой надежностью.

Основными недостатками современных схем на параметронах являются необходимость в высокочастотном источнике энергии и относительно большое потребление мощности при работе на высоких частотах, т. е. в вычислительных машинах, где требуются большие скорости выполнения операций. Однако новейшие исследования позволили разработать более экономичные высокочастотные параметроны, которые, очевидно, сыграют важную роль в развитии вычислительной техники.

Глава шестая

ЭЛЕМЕНТЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ТЕХНИКЕ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ

24. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИМЕНЕНИИ СВЕРХВЫСОКИХ ЧАСТОТ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Во всех работающих в настоящее время цифровых вычислительных машинах, кроме машин на параметронах, информация кодируется импульсами постоянного тока. При этом увеличение тактовой частоты и соответствующее уменьшение длительности импульсов ограничивается временными интервалами так называемых релаксационных процессов, связанных с перезарядом емкостей схемы. Длительность этих процессов определяется постоянными времени типа RC, причем существенное уменьшение этого произведения в цепях с сосредоточенными постоянными, используемых в вычислительной технике, является сложной технической задачей.

В то же время современной радиотехникой уже освоены процессы с временными интервалами наносекундной и меньшей длительности. Такие процессы могут быть реализованы на базе использования колебаний сверхвысоких частот в диапазоне сантиметровых и миллиметровых волн. При этом появляется возможность приблизиться к скоростям работы машин порядка сотен миллионов арифметических операций в секунду, т. е. к тому практическому пределу быстродействия, который обусловлен конечным временем рас-

пространения импульсов между отдельными элементами вычислительной машины. Практически реализация вычислительных устройств, работающих на сверхвысоких частотах, когда временны́е интервалы переходных процессов определяются схемными параметрами типа произведений LC, требует использования цепей с распределенными постоянными, ламп бегущей волны, специальных высокочастотных диодов, параметрических и молекулярных генераторов и усилителей и других элементов современной радиотехники.

Применение колебаний сверхвысоких частот позволяет значительно повысить гибкость вычислительных устройств. Кроме принципа амплитудного кодирования информации, применяемого во всех современных машинах (есть импульс — «1», нет импульса — «0»), в машинах, работающих на сверхвысоких частотах, можно использовать скачки фаз и частот колебаний. При этом возможно комбинированное кодирование информации путем одновременного использования амплитудных, частотных и фазовых методов разделения сигналов.

Применение в сверхвысокочастотных вычислительных системах амплитудного принципа различения информации (наличие или отсутствие импульсов сверхвысокой частоты) при наносекундной длительности импульсов требует чрезвычайно широкой полосы пропускания (до сотен мегагерц). Значительно снизить требуемую полосу пропускания можно в системах, в которых информация кодируется применением двух частот или двух фаз колебаний. Последний способ кодирования информации используется в японских машинах на параметронах, однако на относительно низких частотах, что обусловлено применением в них в качестве переменного параметра катушки с сердечником.

Используя в качестве переменного параметра емкость полупроводниковых диодов, можно получить параметрические колебания на частотах порядка тысяч мегагерц.

25. ЗАПОМИНАЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Динамические рециркуляционные устройства на линиях задержки. Общие принципы работы динамических запоминающих устройств на линиях задержки сводятся к следующему. Информация, закодированная в виде электрических импульсов, поступает через ключ K_1 на вход схемы (рис. 45), проходит по линии задержки, в которой, помимо запаздывания во времени, происходит затухание амплитуды импульсов, усиливается усилителем, компенсирующим

затухание в тракте, проходит через ключ K_3, вновь поступает в линию задержки и т. д.

Считывание информации может осуществляться каждый раз в течение времени, когда кодовые импульсы соответствующего числа появляются на выходе усилителя. Тогда, открывая ключ K_2, можно ответвить их на выход схемы. Стирание информации осуществляется путем разрыва цепи рециркуляции ключом K_3.

Емкость подобного запоминающего устройства определяется выражением

$$n = f\tau_з,$$

где n — число импульсов, которое одновременно может циркулировать в замкнутой цепи;

f — частота следования импульсов;

$\tau_з$ — время распространения импульсов вдоль линии задержки.

При кодировании информации импульсами постоянного тока с относительно низкой частотой следования приходится применять ультразвуковые линии задержки (ртутные, пьезоэлектрические и магнитострикционные). При этом возникают трудности, связанные с необходимостью преобразовывать электрические импульсы в механические колебания ультразвуковой частоты. Импульсы постоянного тока предварительно преобразуются в радиоимпульсы, которые подаются в пьезоэлектрические или магнитострикционные преобразователи для получения механических колебаний в линии задержки. На выходе последней должен быть осуществлен процесс обратного преобразования. Естественно, что все это усложняет соответствующее запоминающее устройство и снижает его надежность.

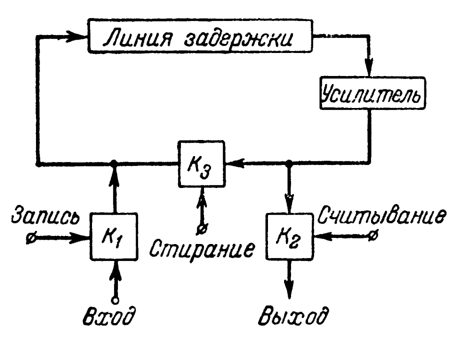


Рис. 45. Упрощенная блок-схема динамического запоминающего устройства на линии задержки.

Применение для кодирования информации радиоимпульсов наносекундной длительности с частотой следования порядка сотен мегагерц открывает возможность широ-

кого использования в качестве линий задержки волноводов.

Процесс распространения электромагнитной энергии можно рассматривать как результат многократных отражений волн от противоположных стенок волновода (рис. 46). Поэтому, хотя скорость движения волны и равна скорости света c, но составляющая скорости распространения сигнала вдоль волновода или так называемая групповая скорость распространения $v_{гр}$ может стать сколь угодно малой при приближении угла падения волны на стенку волновода α к нулю, так как $v_{гр}=c \sin \alpha$. Практически легко получить групповую скорость раз в 10 меньшую скорости света. Следовательно, при длине волноводной линии, например, 3 *м* можно получить $\tau_з=100$ *нсек* и при $f=10^9$ *гц* запоминать в такой линии задержки до 100 импульсов. Важными преимуществами такого устройства является отсутствие преобразователей и относительно малое затухание амплитуды импульсов.

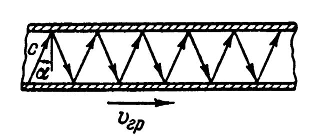


Рис. 46. Распространение электромагнитных колебаний вдоль волновода.

Триггер на лампе бегущей волны. Как известно, лампы бегущей волны применяются в качестве широкополосных усилителей в миллиметровом и сантиметровом диапазонах сверхвысоких частот. Лампа бегущей волны представляет собой электровакуумный прибор, основанный на взаимодействии пучка электронов с бегущей электромагнитной волной, замедленной специальной системой, обычно выполненной в виде проволочной спирали.

Так как подводимые к лампе электромагнитные колебания распространяются вдоль спирали почти со скоростью света, то вдоль оси спирали скорость распространения их в несколько раз меньше скорости света и равна произведению скорости света на отношение шага спирали к длине ее витка.

Следовательно, время распространения поданного на вход лампы бегущей волны сигнала при длине лампы порядка 20—30 *см* может составить несколько наносекунд. Если соединить выход лампы со входом цепью обратной связи и создать, таким образом, замкнутую цепь рециркуляции импульсов, то, например, при длительности импульсов в 1 *нсек* в таком динамическом триггере на лампе бегущей волны могут циркулировать одновременно несколько

импульсов. Такая система работает подобно динамическому запоминающему устройству рециркуляционного типа на линии задержки, с той лишь разницей, что в данном случае лампа бегущей волны выполняет роль и линии задержки и усилителя, компенсирующего затухание энергии импульсов при их рециркуляции по замкнутому кольцу.

Благодаря тому, что лампы бегущей волны имеют полосу пропускания порядка нескольких гигагерц, даже очень короткие импульсы относительно хорошо сохраняют свою форму при прохождении вдоль лампы.

Емкость такого запоминающего динамического триггера ограничивается, очевидно, одним числом со столькими разрядами, сколько импульсов могут одновременно следовать друг за другом в замкнутой цепи рециркуляции, т. е. равна отношению времени распространения импульса вдоль лампы к периоду следования импульсов. Запись и считывание информации в случае хранения в триггере одного числа осуществляется последовательно, разряд за разрядом.

Если применить в запоминающем устройстве несколько таких триггеров, используя каждый триггер для запоминания определенного разряда всех чисел, то можно осуществить параллельную запись и считывание информации. При этом общая емкость запоминающего устройства составит столько чисел, сколько импульсов запоминается одним триггером, а количество разрядов в запоминаемых числах будет определяться количеством триггеров в устройстве.

Запоминающие элементы на параметрических генераторах с фазовой синхронизацией (параметронах). Рассмотренные в гл. 5 параметроны могут быть использованы и в качестве элементов оперативных запоминающих устройств, работающих по принципу совпадения двух токов. При этом, используя сверхвысокие частоты, можно осуществлять обращение к запоминающему устройству с циклом порядка нескольких наносекунд.

В генераторах, работающих на частотах 4—10 *Мгц*, применялся контур с сосредоточенными постоянными, причем в качестве управляемого нелинейного элемента контура использовалась емкость плоскостных диодов. На частотах порядка $(2 \div 4)10^9$ *гц*, т. е. на волнах сантиметрового диапазона, в качестве колебательного контура применялся объемный резонатор, переменным параметром являлась переменная емкость точечного диода, помещенного в резонатор, а для ввода и вывода сигналов и для возбуждения

контура использовались несимметричные полосковые линии.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями установлена возможность переключения параметрических генераторов с фазовой синхронизацией из одного устойчивого состояния в другое несколькими способами. Один из способов, получивший название принудительного переключения, состоит в том, что в генератор, в котором уже существуют колебания одной фазы, вводится сигнал большой

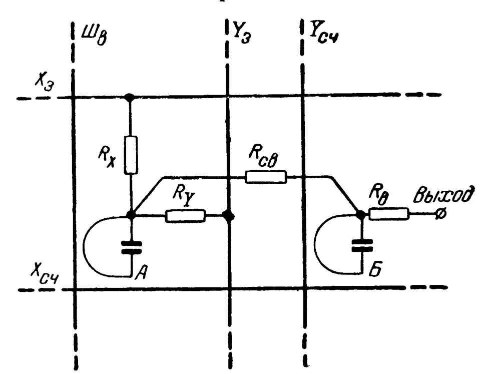


Рис. 47. Схема элемента оперативного запоминающего устройства с совпадением двух токов на параметронах.

величины, достаточной для принудительного установления новой фазы колебаний. При этом сначала гасятся колебания, существовавшие в контуре до появления сигнала, а затем возникают колебания с новой фазой. Если же фаза сигнала совпадает с фазой существующих в контуре колебаний, то в контуре не произойдет никаких изменений, кроме небольшого возрастания амплитуды колебаний во время действия фазирующего сигнала.

Способ принудительного переключения используется для записи колебаний в запоминающем элементе, изображенном на рис. 47. Каждый из таких элементов, которые располагаются в узлах матричного запоминающего устройства, содержит два параметрических генератора *А* и *Б*. Первый из них служит для запоминания информации, второй используется только для считывания.

Запись информации в элемент осуществляется подачей совпадающих по фазе сигналов в шину записи X_3 и Y_3. Уровень каждого из этих сигналов в отдельности недоста-

точен для переключения генератора. Таким образом, обеспечиваются селекция нужного элемента и принудительное установление в нем колебаний нужной фазы, поступающих в контур избранного генератора *А* с шин $X_з$ и $Y_з$ через сопротивления R_x и R_y. Возбуждение всех элементов *А* матрицы обеспечивается постоянным наличием колебаний возбуждения двойной частоты на шинах $Ш_в$.

Для считывания информации напряжение возбуждения подается на соответствующие шины считывания $X_{сч}$ и $Y_{сч}$, причем происходит выбор контура *Б* нужного запоминающего элемента. Этот контур, связанный с контуром *А* того же элемента через сопротивление $R_{св}$, возбуждается в той же фазе, что и контур *А*, причем на выходе возникает сигнал считывания. Выходы всех элементов *Б* матрицы через сопротивления $R_в$ подсоединены к общему выходу считывания с данной матрицы. Сигнал считывания может сниматься с контура *Б* также и индуктивным путем. При этом вторичные обмотки всех выходных трансформаторов соединяются последовательно, образуя общую цепь считывания.

После окончания запросных импульсов возбуждения в шинах $X_{сч}$ и $Y_{сч}$ колебания в контуре *Б* прекращаются. Считывание информации в описанной схеме не сопровождается ее разрушением.

Вследствие разделения селектирующих шин при записи ($X_з$ и $Y_з$) и при считывании ($X_{сч}$ и $Y_{сч}$) в описанной схеме подобно схеме на трансфлюксорах имеется возможность одновременно и независимо осуществлять запись и считывание информации по двум разным адресам.

26. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Основными логическими элементами, из которых могут быть построены сложные логические схемы, как известно, являются элементы «НЕ», «И» и «ИЛИ». Рассмотрим некоторые возможности построения таких элементов в диапазоне сверхвысоких частот.

Элемент «НЕ». В качестве простейшего элемента «НЕ» может быть использовано Т-образное волноводное соединение (рис. 48,*а*). При этом в одно плечо подаются опорные колебания с некоторой фиксированной фазой, а в другое (на основной вход) — сигнал, представляемый колебаниями той же частоты, но с другой фазой. При отсутствии сигнала опорные колебания проходят на выход элемента. При подаче же сигнала на вход в результате сложения двух

колебаний с противоположными фазами сигнал на выходе будет исчезать. Однако в такой схеме вследствие отражения часть выходной мощности попадает на вход.

Этот недостаток устранен в логическом элементе «НЕ», построенном на волноводном мосте кольцевого типа (рис. 48,*б*). Длина окружности кольцевого волновода равна $^3/_2\ \lambda$, где λ — длина волны электромагнитных колебаний. У кольца имеется четыре волноводных ответвления, разнесенных одно от другого на $\lambda/4$. При отсутствии сигнала на

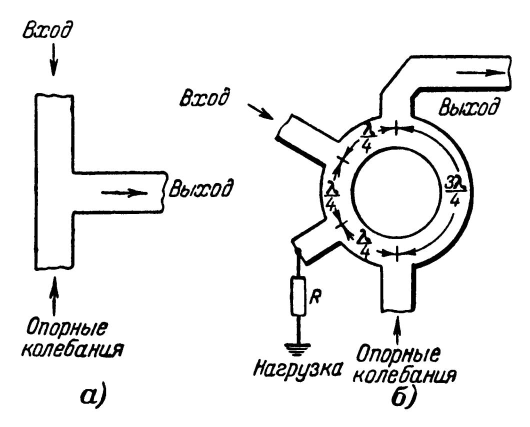


Рис. 48. Логические элементы „НЕ".
а — на Т-образном волноводном соединении; *б* — на волноводном мосте кольцевого типа.

входе половина мощности опорных колебаний поглощается в балластной нагрузке R, а другая половина проходит на выход. На сигнальный вход опорные колебания не попадают, так как ответвление входа отстоит от места ввода этих колебаний на $\lambda/2$ с одной и на λ с другой стороны.

При подаче на вход сигнала той же фазы, что и опорные колебания, сигнал на выходе исчезает, так как сигнальные колебания проходят по кольцу до выхода расстояние $\lambda/4$, а опорные колебания — расстояние $^3/_4\ \lambda$, т. е. на $\lambda/2$ больше. Таким образом, эти колебания попадают к выходу в противофазе и взаимно уничтожаются.

Элемент «И». Логический элемент «И» представляет собой волноводный мост кольцевого типа (рис. 49) с двумя входами *А* и *Б*, нагрузочным ответвлением и выходом. Выход схемы зашунтирован специальным нелинейным элементом, который носит название экспандера.

Экспандер представляет собой отрезок линии длиной в четверть волны, на конце которого включен микроволновый точечный диод. Образованный таким образом четвертьволновый реактивный шлейф имеет входное сопротивление, близкое к нулю, когда диод закрыт, и весьма большое, когда диод находится в проводящем состоянии.

Нормально диод экспандера закрыт напряжением смещения, подаваемым от специального источника постоянного тока. Благодаря этому цепь выхода оказывается замкнутой накоротко, и колебания сверхвысоких частот при небольшой амплитуде на выход не попадают. Если высокочастотный сигнал оказывается достаточным по амплитуде для открывания диода, то входное сопротивление экспандера в месте его подключения к выходной линии резко возрастает, шунтирующее действие прекращается, и сигнал сверхвысокой частоты пропускается на выход.

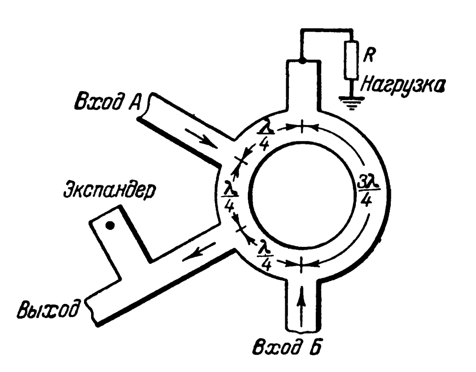


Рис. 49. Логический элемент „И“ на волноводном мосте кольцевого типа.

Если в схеме, изображенной на рис. 49, подать сигнал только на один из входов *А* или *Б*, то половина мощности этого сигнала будет выделяться в нагрузке *R*, а другая половина замыкается накоротко экспандером и на выход логического элемента не проходит. Если же сигналы равных амплитуд и фаз подать на оба входа (*А* и *Б*), то к нагрузочному ответвлению они приходят в противофазе, и на нагрузке мощность не выделяется. При этом в выходном ответвлении сигналы складываются в фазе, мощность, попадающая на экспандер, возрастает в 4 раза, диод отпирается, вход экспандера перестает замыкать выходное ответвление, и сигнал сверхвысокой частоты поступает на выход.

Таким образом, описываемый элемент выдает сигнал на выходе лишь при совпадении во времени сигналов на обоих его входах, т. е. работает как классическая схема совпадения, реализующая логическую операцию «И».

Описанная схема «И» легко может быть преобразована в схему полусумматора, обеспечивающего сложение одно-

разрядных двоичных чисел. Для этой цели нужно отключить балластную нагрузку и использовать это волноводное ответвление, как выход суммы *С*. Ответвление же, с которого в схеме «И» снимался сигнал, в полусумматоре является выходом цепи переноса *П* в следующий разряд.

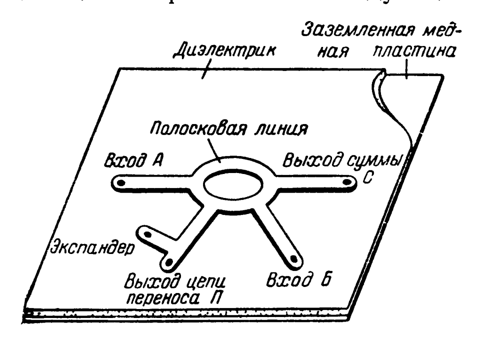


Рис. 50. Схема конструкции двоичного полусумматора на полосковых линиях.

Схема конструкции такого полусумматора, построенного на полосковых линиях, приведена на рис. 50. Легко проследить, что логическая связь между входными и выходными сигналами этой схемы определяется данными табл. 2.

Таблица 2

Входные сигналы		Выходные сигналы	
А	*Б*	*С*	*П*
0	0	0	0
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

Недостатком такого полусумматора, затрудняющим его сопряжение с другими элементами вычислительной машины, является то, что фаза сигнала суммы здесь зависит от того, на каком из входов (*А* или *Б*) имеется сигнал. Для устранения этого недостатка в цепь выхода суммы может быть включена схема, в которой выходной сигнал детектируется и превращается в видеоимпульс, который уже используется для модуляции сигнала сверхвысокой частоты с неизменной фазой.

На описанных принципах строятся и более сложные логические схемы. Для генерирования и усиления колебаний сверхвысоких частот в вычислительных машинах могут также применяться молекулярные генераторы и усилители.

В заключение нужно подчеркнуть, что описанные принципы использования сверхвысоких частот в цифровой вычислительной технике представляют собой пока только экспериментальные поисковые работы, которые открывают перспективы дальнейшего повышения быстродействия машин в сотни и тысячи раз по сравнению с наиболее быстродействующими современными цифровыми машинами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренными в данной книге некоторыми новыми элементами, уже получающими применение в электронных вычислительных машинах, далеко не исчерпываются возможности дальнейшего расширения разработок, имеющих своей целью повышение скорости работы и экономичности и уменьшение размеров машин.

Как за рубежом, так и в нашей стране непрерывно расширяется круг научно-исследовательских организаций и конструкторских бюро, в которых проводятся работы по использованию новых физических и химических принципов для создания наиболее надежных, быстродействующих, миниатюрных и экономичных элементов для цифровых машин.

При этом наряду с использованием явлений неорганического мира делаются попытки применить закономерности биологических процессов и методов к решению инженерных задач. На этой почве возникла новая отрасль технической кибернетики — бионика, наука о технических системах, характеристики которых приближаются к характеристикам живых организмов.

Благоприятная почва для развития бионики создана быстрым развитием вычислительной техники, большими успехами в области микроминиатюризации радиоэлектронных элементов и блоков и все возрастающими потребностями в передаче, хранении и переработке колоссальных объемов информации.

Первыми шагами в этой области является создание электрических моделей нейронов и нервных сетей. Нейрон, как запоминающий и логический элемент, представляет собой весьма гибкую и пластическую структуру, обладающую во много раз бо́льшим количеством возможностей, чем наиболее сложные технические элементы.

Нейрон имеет множество входов, представляющих собой так называемые синаптические контакты, которые обладают свойством задержки и характеризуются весом, т. е. сте-

пенью воздействия их на процессы внутри нейрона. Внешние воздействия на тело нейрона суммируются во времени и пространстве, причем эффект их действия затухает во времени по экспоненциальному закону. Если суммарное входное воздействие достигает или превышает некоторую пороговую величину, то нейрон возбуждается и выдает на выход или на несколько идентичных выходов сигнал с определенной энергией. После возбуждения нейрона порог его срабатывания быстро возрастает и затем уменьшается по экспоненциальному закону, стремясь к своей нормальной величине.

Перечисленные свойства нейрона и, в частности, суммирование входных сигналов во времени и пространстве с учетом задержек их на синаптических входах и затухания обусловливают многообразие логических возможностей уже одного, отдельно взятого нейрона или небольшой группы их. Если же учесть, что количество нейронов в биологических системах измеряется многими миллионами, достигая в мозгу человека 10—15 миллиардов, то становятся понятными колоссальные возможности, заложенные в нервной сети живого организма с точки зрения диапазона решаемых задач, гибкости, надежности, способности самонастройки и самоорганизации и т. д.

В настоящее время разработано большое количество моделей нейронов на электромеханических элементах, электронных лампах, транзисторах, ферритовых сердечниках, биаксах и других технических элементах. Проводятся также и работы по созданию моделей нейронных схем и систем, имитирующих некоторые процессы нервной деятельности живых организмов.

Одной из наиболее продвинутых разработок в области использования биологических закономерностей в технике является самоорганизующаяся система, обладающая познавательными способностями — перцептрон, «опознающая» и классифицирующая различные изображения.

Можно предположить, что в дальнейшем развитии вычислительной техники наряду с инженерами и математиками все большее участие будут принимать биологи, которые помогут перенести в создание кибернетических машин совершеннейшие механизмы управления и связи в живых организмах, выработавшиеся в результате миллиардов лет эволюционного развития органической природы на нашей планете.

ЛИТЕРАТУРА

Бачин О. В., Возможности применения трансфлюксоров в запоминающих и задающих устройствах, Ин-т точной механики и вычислительной техники АН СССР, 1959.

Бесконтактная коммутация и электронные АТС, Информационный сборник, Связьиздат, 1958.

Гальперин Е. И., Сулицкий Ю. Н., Полупроводниковые логические переключающие схемы, Изд. «Советское радио», 1960.

Заволокина З. И., Магнитные элементы в цифровых вычислительных устройствах, Госэнергоиздат, 1958.

«Зарубежная радиоэлектроника», 1960, № 2, № 8; 1961, № 6.

Китов А. И., Криницкий Н. А., Электронные цифровые машины и программирование, Физматгиз, 1959.

Клейн М. Л., Морган Г. С., Аронсон М. Г., Цифровая техника для вычислений и управления, Изд. иностранной литературы, 1960.

Конференция «Пути развития советского математического машиностроения и приборостроения», Москва, 12—17 марта, 1956.

Крайзмер Л. П., Запоминающие устройства, Госэнергоиздат, 1959.

Крайзмер Л. П., Устройства хранения дискретной информации (запоминающие устройства), «Приборы и техника эксперимента», 1958, № 6.

Маслов А. А., Электронные полупроводниковые приборы. Госэнергоиздат, 1960.

Применение транзисторных и магнитных элементов в цифровых вычислительных машинах, Сборник статей под ред. В. К. Любченко и С. М. Никулина, Изд. «Советское радио», 1960.

Румпф К. Х., Электроника в телефонной технике, Госэнергоиздат, 1960.

Цифровая техника и вычислительные устройства, Сборник статей, Изд. АН СССР, 1959.